

ONDELETA DE MORLET APLICADA AO ESTUDO DA VARIABILIDADE DO NÍVEL DO RIO PARAGUAI EM LADÁRIO, MS¹

LEONARDO DEANE DE ABREU SÁ², SABRINA BÉRGOGH MONTEIRO SAMBATTI³
e GERALDO PEREIRA GALVÃO⁴

RESUMO - A ondeleta complexa de Morlet foi utilizada para estudar as escalas em que o nível do rio Paraguai em Ladário (MS) apresenta maior variabilidade. Para tanto, investigou-se uma série de dados diários deste rio, abrangendo o período de janeiro de 1900 a junho de 1995. Obtiveram-se os seguintes resultados relevantes: (a) verificou-se variabilidade dominante na escala anual, a qual se manteve estacionária; (b) detectou-se variabilidade importante num intervalo de escalas de 2 a 5 anos, a qual não se mostrou persistente; (c) observou-se outra variabilidade marcante no intervalo de escalas de 10 a 11 anos, aproximadamente, a qual se mostrou persistente; (d) no diagrama resultante da análise da fase do sinal em tempo-escala, apontaram-se regiões com linhas de convergência de fase. Estas conclusões são discutidas e comparadas com outras investigações sobre a variabilidade de dados hidrometeorológicos.

Termos para indexação: hidrometeorologia, rio Paraguai, variabilidade, ondeleta, singularidades, Pantanal.

APPLYING THE MORLET WAVELET IN A STUDY OF VARIABILITY OF THE LEVEL OF PARAGUAY RIVER AT LADÁRIO, MS

ABSTRACT - The Morlet complex wavelet was used to study the scales when the level of Paraguay River in Ladário (MS) is more variable. A series of daily data of the river, from January 1900 to June 1995, was used. The following relevant results were obtained: (a) important dominant variability was noticed at the annual scale, that was stationary; (b) important variability in the interval of scales from 2 to 5 years, was detected, which was not stationary; (c) another striking variability in the interval of scales from 10 to 11 years, approximately, which was not plainly stationary, was observed; (d) regions were found with lines of phase convergence in the time-scale signal phase analysis diagram. These conclusions are discussed and compared to other investigations on the variability of hydrometeorologic data.

Index terms: hydrometeorology, Paraguay river, variability, wavelet, singularities, Pantanal wetland.

INTRODUÇÃO

Com o objetivo de melhor compreender a variabilidade do nível do alto rio Paraguai, aplicou-se a técnica matemática que consiste na Transformada em Ondeletas (TO) aos dados da cota deste rio medida em Ladário, Mato Grosso do Sul.

As cheias da bacia do Alto Paraguai prejudicam a atividade econômica e acentuam as adversidades

sociais da região brasileira intitulada de Pantanal. Aí, aos longos períodos de inundação alternam-se outros com baixa precipitação (Darch, 1979), os quais são variáveis em intensidade e duração (Cadavid García & Castro, 1986). Estes autores informam ser o Pantanal formado por planícies e leques aluviais que fazem parte da bacia do Alto Paraguai, localizada entre os paralelos 16° e 22° de latitude Sul e os meridianos 55° e 58° de longitude Oeste. O rio Paraguai em Ladário (Corumbá), depois de receber contribuições dos rios que formam sua bacia em território brasileiro, apresenta dois ciclos de cheias: o primeiro, influenciado pelos rios Aquidauana, Miranda, Negro e Taquari, com inundações nos meses de fevereiro a março; e o segundo, e principal, com a chegada das águas

¹ Aceito para publicação em 4 de março de 1998.

² Físico, Dr., Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Av. dos Astronautas, 1758, Caixa Postal 515, CEP 12201-970 São José dos Campos, SP. E-mail: leo@met.inpe.br

³ Analista de Sistemas, INPE. Bolsista do CNPq-RHAE.

⁴ Físico, M.Sc., INPE.

procedentes da alta bacia do rio Paraguai, em abril/junho (Silva, 1991).

Como assinala Tucci (1993), a variação do nível ou da vazão de um rio depende das características climatológicas e físicas da bacia hidrográfica concernente, sendo as distribuições temporal e espacial da precipitação as principais condições climáticas. Com relação ao Pantanal, contudo, os estudos referentes à sua climatologia ainda não são numerosos. Algumas das poucas pesquisas sobre o assunto serão citadas a seguir.

Uma análise das características estatísticas dos regimes de distribuição pluviais em microrregiões climatologicamente homogêneas do Pantanal pode ser encontrada em Cadavid García & Castro (1986).

Rao & Hada (1990), em estudo sobre as características da precipitação no Brasil (dados de 1958-1978), apontam a região da Bacia do Alto Paraguai como apresentando suas séries de precipitação praticamente não correlacionadas com um índice da Oscilação-Sul escolhido pelos autores.

Estudos sobre a dinâmica da circulação atmosférica acima da região Centro-Oeste do Brasil, em geral, e sobre o Pantanal, em particular, ainda são em pequeno número, certamente constituindo-se essa região numa das menos estudadas do Brasil do ponto de vista meteorológico. Dentre uma das poucas pesquisas tentando explicá-la, James & Anderson (1984) sugeriram, a partir do exame de médias sazonais dos campos de velocidade do vento a 850 hPa acima da América do Sul, que o campo de vento acima da região do Pantanal é principalmente de noroeste. Isto, sendo uma consequência da ação da barreira em níveis baixos representada pela Cordilheira dos Andes, com relação aos fortes ventos equatoriais de leste que cruzam o Oceano Atlântico adentrando a Amazônia. Ainda, segundo os autores citados anteriormente, da existência desta barreira natural e talvez também da vortacidade de grande escala induzida pela extensa convecção que ocorre sobre a região central da América do Sul, decorre a incidência do escoamento para o sul, de tal forma a determinar a predominância de ventos de noroeste na região. Assim, estes transportariam ar úmido da região equatorial para o sul, fenômeno que não é observado em outras

longitudes do Hemisfério Sul. Isto, provavelmente, está associado à comprovada ocorrência de centros de alta precipitação, com orientação de noroeste para sudeste, situados no oeste da Amazônia e no Brasil Central. Esta orientação coincide com a posição média da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), particularmente no verão, a qual possivelmente está associada com a convergência de umidade nos níveis baixos induzida por sistemas frontais deslocando-se para o equador (Figueroa & Nobre, 1990).

Outro fator dinâmico a determinar o clima da região Centro-Oeste do Brasil parece ser a existência da circulação anticiclônica em níveis altos centrada no Planalto Boliviano durante o verão austral, a qual constitui-se em fonte de liberação de calor latente e de calor sensível na média troposfera. Esta liberação de calor, aquecendo a atmosfera acima da região, ajuda na manutenção do anticiclone na troposfera superior durante o verão e colabora na formação de ciclones transientes no nível inferior nas regiões vizinhas, provocando aí um aumento da precipitação (Virji, 1981; Dias et al., 1983; Nishizawa & Tanaka, 1983; Kleemann, 1989).

MATERIAL E MÉTODOS

Tem sido demonstrado que a Análise de Fourier (AF) tradicional não é recomendável na investigação de fenômenos não-estacionários ou naqueles em que o sinal sofre variações bruscas (Farge, 1992). A Transformada em Ondeletras (TO), cuja base matemática foi constituída recentemente (Meyer, 1990), parece oferecer uma alternativa vantajosa à AF nestas situações. Ela decompõe a informação contida na série temporal, tanto em tempo quanto em escala (frequência). Assim, pode ser concebida como uma espécie de Transformada de Fourier evolutiva.

Gabor (1946) foi um dos primeiros a ressaltar a limitação da análise convencional de Fourier e a sugerir uma estratégia de análise do sinal em tempo-escala. Ele propôs um método pelo qual, na repartição da informação no tempo e na frequência, há um compromisso arbitrado pelo princípio da incerteza de Heisenberg. Assim, quanto melhor a localização temporal, pior será aquela em frequência e vice-versa. Isto salienta as vantagens da aplicação do método de Gabor com relação àquele clássico de Fourier.

O método de Gabor, todavia, como salientam Gasquet & Witomski (1990), apresenta o grande inconveniente de

possuir janela de comprimento fixo, desvantagem considerável quando se quer analisar sinais cujas variações podem ocorrer em muitas escalas, como parece ser o caso do sinal geofísico, em geral (Schertzer & Lovejoy, 1991) e meteorológico, em particular (Gamage & Blumen, 1993).

Esta limitação parece ter sido superada por um novo método de análise do sinal, a Transformada em Ondeletras (TO), em que a janela varia não somente por translação mas também por dilatação ou contração, como se fosse uma “sanfona”. Meyer (1990) estabeleceu bases matemáticas sólidas para esta nova técnica ao explicitar as condições de ortogonalidade deste novo operador.

A TO analisa um sinal temporal $s(y)$ em cada instante t sobre um intervalo de escala a . Assim, a transformada de um sinal definido sobre um intervalo unidimensional é apresentada como sendo uma função de duas variáveis, t e a , as quais devem ser consideradas como independentes. Então, a TO estuda uma escala particular pela convolução de $s(y)$ com uma ondeleta localizada, a função $g_{at}(y)$, a qual estará dilatada ou contraída a partir de uma “ondeleta-mãe”, $g(y)$, em função da escala investigada. $g_{at}(y)$, é definida por (Lau & Weng, 1995):

$$g_{at}(y) = \frac{1}{\sqrt{a}} g\left(\frac{y-t}{a}\right) \quad (1)$$

Segundo Lau & Weng (1995), a TO é definida por:

$$T_g(a, t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} g^*\left(\frac{y-t}{a}\right) s(y) dy \quad (2)$$

onde g^* representa o complexo-conjugado de g definida sobre o semiplano (t, a) . Os valores de $T_g(a, t)$ exprimem, então, a decomposição do sinal $s(y)$ em posição t e em escala a precisas. O conjunto dos valores deste parâmetro fornece, assim, uma representação bidimensional do sinal no tempo (espaço) e em escala (frequência ou número de onda). Segundo Farge (1992), pode-se definir uma densidade de energia no tempo-escala:

$$S(a, t) = \frac{|T_g(a, t)|^2}{a} \quad (3)$$

Pode-se obter, também, a fase $\Omega(a, t)$ do sinal, num instante t e numa escala a :

$$\Omega(a, t) = \arctg \left[\frac{\text{Im} [T_g(a, t)]}{\text{Re} [T_g(a, t)]} \right] \quad (4)$$

Uma utilização importante da informação fornecida pela fase do sinal consiste na detecção de uma singularidade isolada em uma localização t_0 , precisa, conforme é relatado por Mallat & Hwang (1992). Estes autores demonstraram, do ponto de vista matemático, que a TO constitui a ferramenta adequada para detectar singularidades isoladas nos sinais. Nestas, as isolinhas da fase $\Omega(a, t)$ convergem para uma abscissa t_0 , quando a escala tende para zero, o que abre novas perspectivas para a pesquisa rigorosa das regiões em que o sinal varia bruscamente.

A escolha da ondeleta de investigação ainda constitui questão aberta na análise do sinal e está relacionada com o problema que se deseja estudar. Assim, desde que sejam conhecidas as características gerais do sinal a ser investigado, a opção pela ondeleta de análise deverá ser efetuada de tal forma que esta possua atributos similares aos do sinal (tais como assimetria ou não, variação brusca ou suave no tempo, etc.).

Neste trabalho, optou-se pela utilização da ondeleta complexa de Morlet de forma:

$$g(t) = e^{i\omega_0 t} e^{-t^2/2}, \quad \omega_0 = 5 \quad (5)$$

a qual constitui uma onda plana de frequência ω_0 , modulada por envelope gaussiano de largura unitária.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Utilizou-se a ondeleta complexa de Morlet por ser esta a mais adequada para captar variações nas periodicidades do sinal geofísico, de maneira contínua ao longo das escalas. Uma das principais vantagens da utilização da TO resulta do fato de esta fornecer uma representação do sinal facilmente interpretável visualmente (Grossmann et al., 1989). Tendo em vista isto, investigou-se a parte real do coeficiente da ondeleta, a qual é capaz de descrever tanto a intensidade quanto a fase do sinal, em localizações específicas do domínio tempo-escala (Weng & Lau, 1994), respeitadas as restrições impostas pelo Princípio da Incerteza de Heisenberg.

Assim, na Fig. 1a, apresentou-se a variação da cota do rio Paraguai para o período de 1900 a 1995 (os valores negativos refletem o fato de o nível nulo não se referir ao nível mais baixo do rio). Na Fig. 1b, mostram-se as intensidades das flutuações por escala, referentes ao sinal da Fig. 1a, para uma resolução de escala inferior a 30 anos. Na Fig. 1a, o eixo horizontal é o tempo em anos, o eixo vertical é a escala em anos (que também pode ser interpretado como frequência, em ciclos por ano) e as isolinhas estão associadas a valores positivos (linhas cheias) ou negativos (linhas pontilhadas) das flutuações numa dada escala e num dado tempo. Nas Figs. 2a, 2b, 2c, são realçados resultados já indicados na Fig. 1b. Nas Figs. 3a e 3b, são apresentados resultados similares aos das Figs. 1a, 2b, com a única diferença de ter sido mostrada a fase do coeficiente da TO e não mais a sua parte real. As linhas verticais das Figs. 1a, 1b apontam regiões onde houve detecção de singularidade a partir da Fig. 3b.

A observação da Fig. 1a evidencia a irregularidade das variações das cotas do rio Paraguai. Um dado digno de nota é a existência de um período de aproximadamente doze anos de duração (1961/1973) em que houve diminuição da precipitação e a amplitude das flutuações reduziu consideravelmente. A este sucede-se um período consideravelmente mais úmido, que continua a perdurar nos dias atuais, no qual os níveis médio e mínimo das flutuações aumentaram consideravelmente. Poder-se-ia questionar, a partir daí, a correção da técnica de medir o nível. Contudo, a climatologia e o relato dos habitantes da região parecem afastar a possibilidade de um erro sistemático na medida.

Na Fig. 1b só são indicados os resultados das escalas superiores a meio ano. Sua observação mostra:

1) O caráter do coeficiente resultante da aplicação da TO ao sinal, que é não-estacionário no tempo e não-persistente em escala. Isto é verificado a partir da observação global do diagrama.

2) Uma escala persistente, de variabilidade marcante, correspondente ao ciclo anual. As flutuações nesta escala são menos intensas no período supramencionado que vai de 1961 a 1973.

Neste, as flutuações em todas as escalas parecem ter se reduzido drasticamente.

3) Um intervalo com flutuações cuja localização variou de uma escala acima de quatro anos no início do século até outra de três anos ao final dos anos 30, quando, então, passou a haver flutuações tanto na escala de dois anos quanto na de quatro até 1950. Desde então, a intensidade das flutuações, no intervalo de escalas de dois a quatro anos, parece ter diminuído consideravelmente, embora ainda seja perceptível uma flutuação na escala de dois anos até 1965, o que é realçado pelas Figs. 2a, 2b.

4) Uma flutuação decadal persistente, que varia de aproximadamente 11 anos no início da análise e que diminui até se estabilizar num patamar da ordem de 10 anos, a partir de 1940. Esta, menos evidente na Fig. 1b, fica nitidamente delineada na Fig. 2c, ampliação de segmento da Fig. 1b.

5) Índícios de uma flutuação da ordem de meio século, no mínimo, a qual se manifesta nos diferentes padrões de variabilidade verificados antes e após 1950, o que é particularmente visível ao se inspecionar o intervalo de escalas de dois a cinco anos na Fig. 1b.

É interessante salientar que Nobre et al. (1984), ao estudarem a variabilidade das cotas do rio Negro, em Manaus, por meio da AF aplicada a dois segmentos amostrais sucessivos, encontraram marcantes diferenças entre o padrão de variabilidade deste rio antes de 1950 e após este ano. Para eles, não deveria existir uma relação direta entre a oscilação quase-bienal dos ventos zonais da estratosfera e a variabilidade do rio Negro na escala de 28 meses. Esta conclusão também parece válida para os resultados desta investigação, uma vez que as flutuações nas escalas da ordem de 2 a 3 anos não são persistentes, contrariamente ao que parece ocorrer com a oscilação quase-bienal (Xu, 1992). Marengo (1995), em seu estudo sobre a variabilidade da vazão de importantes rios da América do Sul, também identificou fortes variações interanuais, as quais apenas em alguns casos corresponderam a eventos de El Niño/Oscilação Sul (ENOS). Entretanto, os períodos de maior variabilidade dos rios por ele estudados não coincidiram, em geral, com aqueles detectados no rio Paraguai.

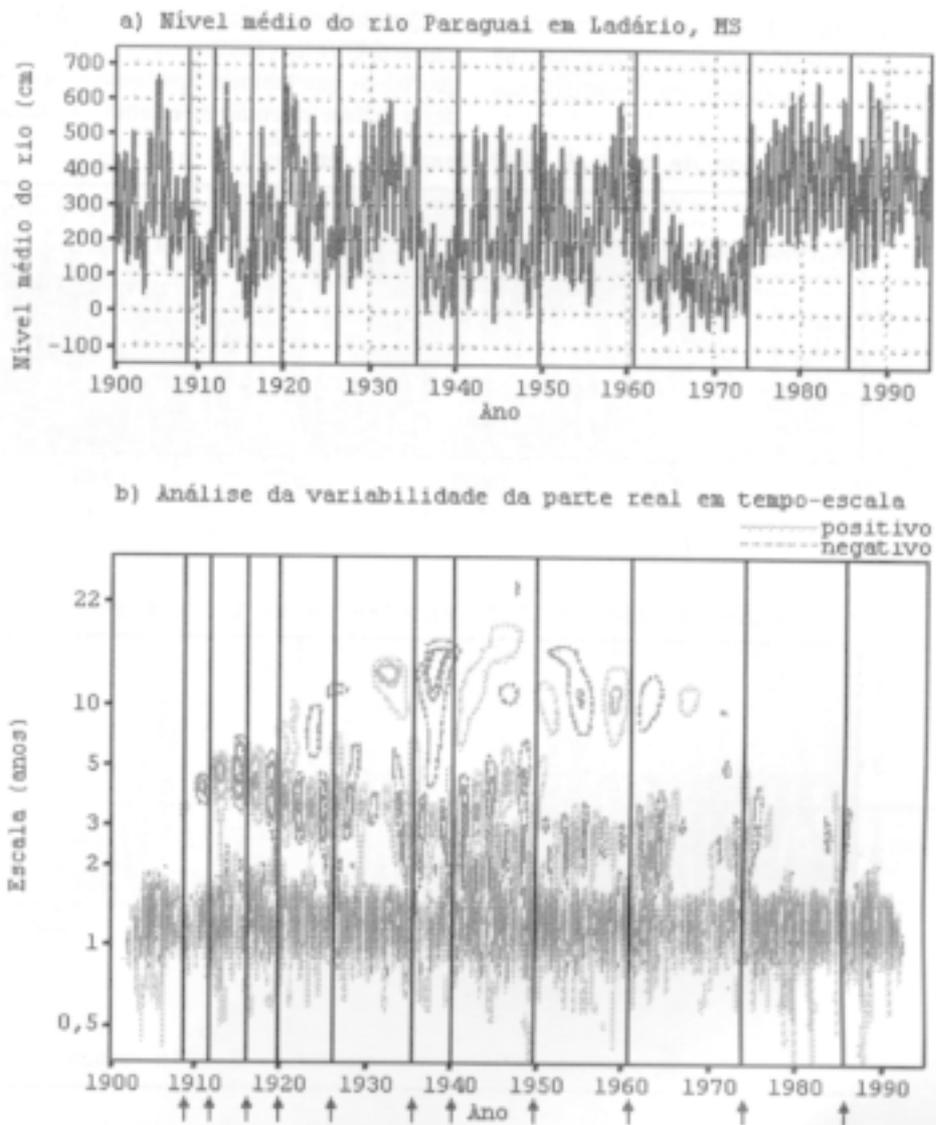


FIG. 1. Investigação da variabilidade do nível do rio Paraguai obtida através da análise da parte real do coeficiente resultante da aplicação da Transformada em Ondeletas aos dados (as setas indicam as localizações das singularidades).

Outros estudos de fenômenos geofísicos mostraram, igualmente, diferenças entre seus padrões de variabilidade do início do século até 1950 e deste ano em diante, particularmente no que se refere à amplitude do ENOS. Isto é apontado por Gu & Philander (1995), que aplicaram a TO a dados atmosféricos e oceânicos referentes ao período de 1870-1988. Ademais, autores já apontaram a

existência de interações não-lineares entre escalas da ordem de 25 e 50 meses (Lau & Sheu, 1988) e 3 a 7 anos (Barnett, 1991). Weng & Lau (1994), com o auxílio da TO, estenderam este tipo de análise às variações nas escalas intra-sazonais. Nestas, elas apontaram o caráter de auto-excitação das oscilações na atmosfera tropical e respectivas forçantes externas. Efetivamente, na investigação aqui

desenvolvida, tais tipos de interação parecem estar presentes em algumas das oscilações detectadas na primeira metade do século, conforme mostrado nas Figs. 1b e 2a.

Quanto às variabilidades na escala interdecadal, Currie & O'Brien (1988) relataram muitos fenômenos geofísicos que também apresentam periodicidades desta ordem e tentaram estabelecer uma relação

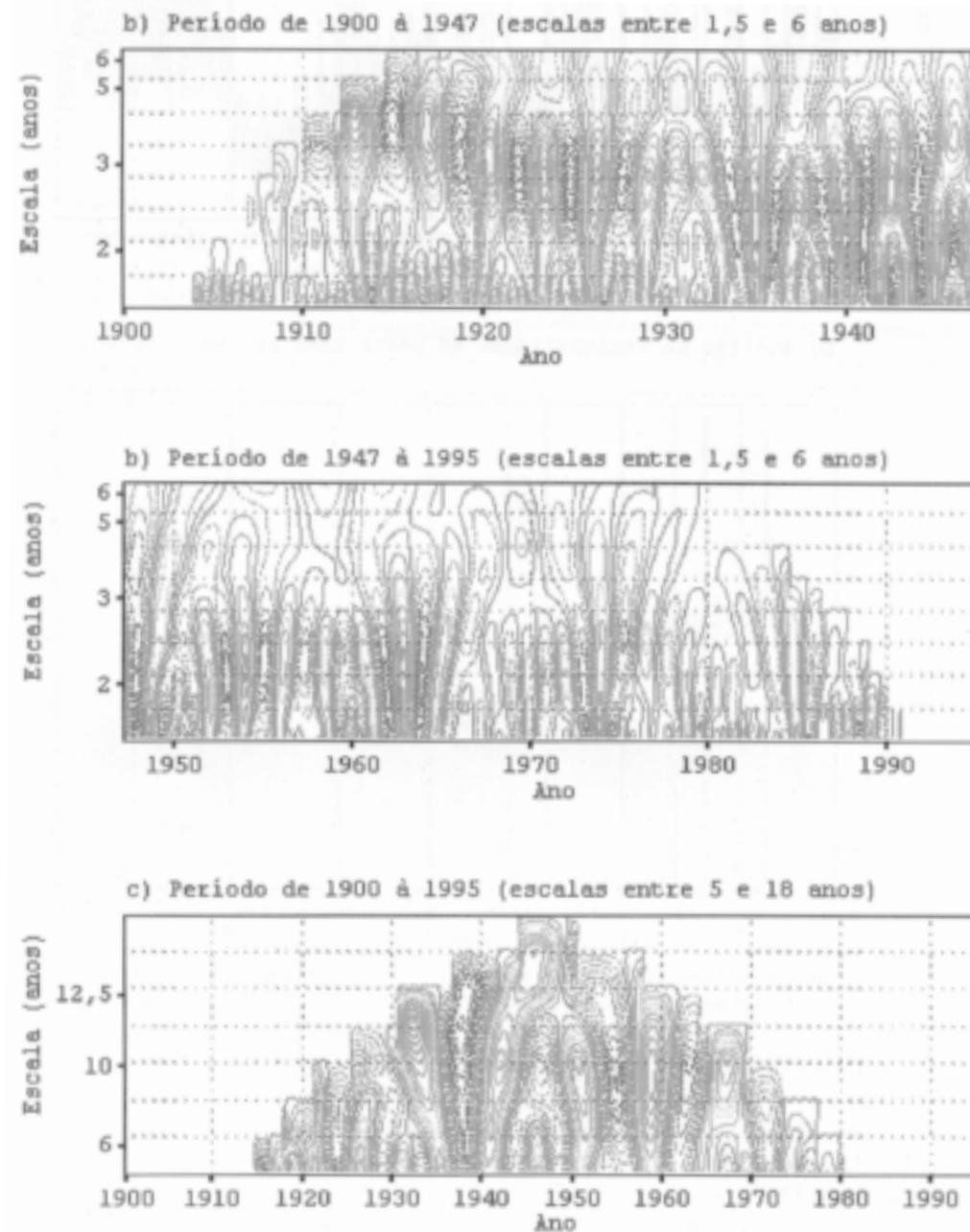
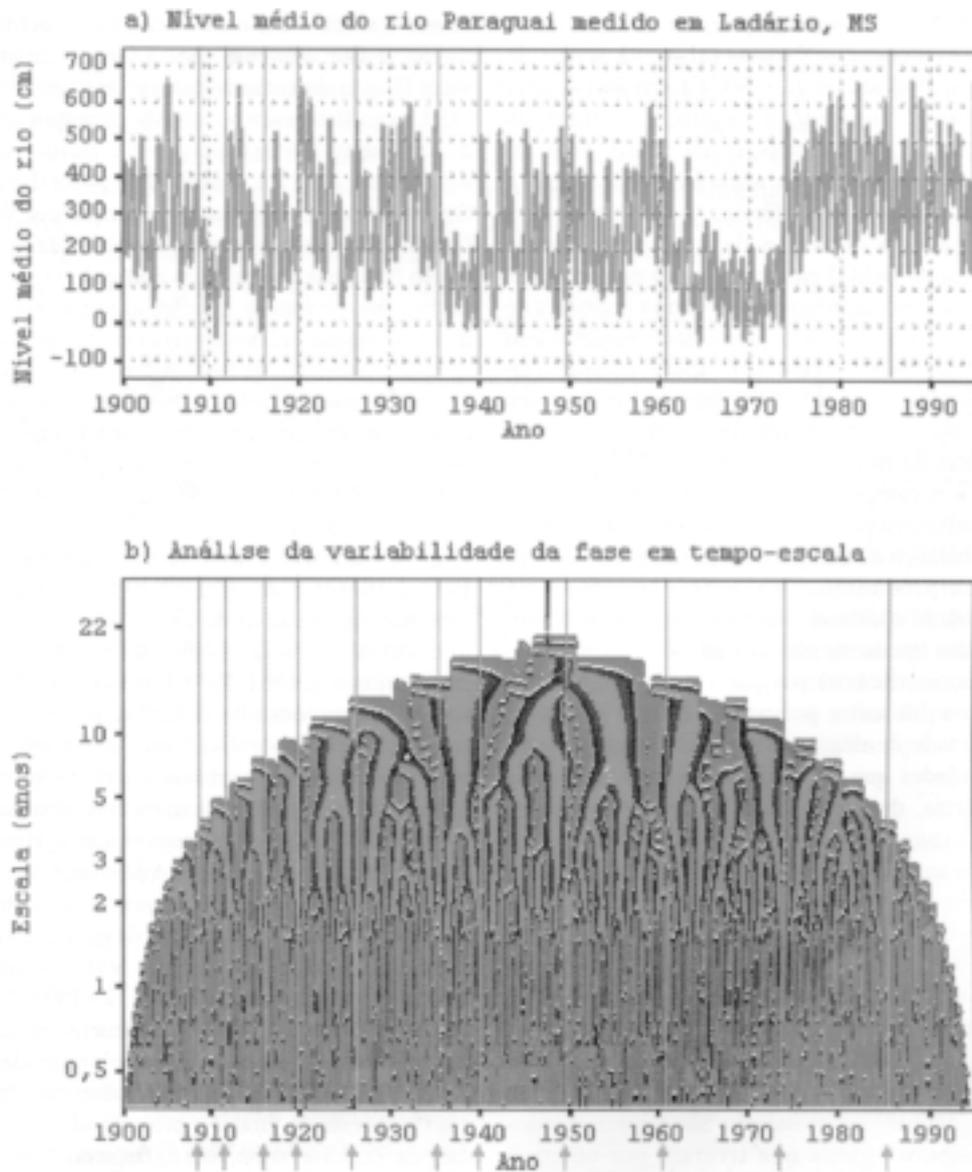


FIG. 2. Análise da variabilidade do nível do rio Paraguai obtida através de realces de partes escolhidas da Fig. 1b.

destes com o ciclo solar de 10-11 anos. Todavia, tal explicação foi duramente contestada por autores, tais como Mann et al. (1995), para os quais tal variabilidade climática, pelo menos no Hemisfério Norte, deva ser atribuída à interação entre o Oceano Atlântico e a atmosfera, ponto de vista que é parcialmente endossado por Allen & Smith (1994).

Todavia, Kerr (1996) discute novas evidências a partir das quais a conexão sol-clima deve ser considerada seriamente, particularmente no que se refere às flutuações de temperatura dos oceanos tropicais e subtropicais. Um outro tipo possível de explicação destas flutuações seria o impacto das erupções vulcânicas no sistema atmosfera-oceano.



Com este fim, Robock & Mao (1995) analisaram registros climáticos de 140 anos e, após separarem eventos de ENOS (escala temporal de resposta de 1 ano) daqueles associados a erupções vulcânicas (escala temporal de resposta de dois anos), comprovaram a resposta da temperatura média global, em cada hemisfério, à forçante vulcânica em diferentes latitudes e épocas do ano.

Com evidência experimental ainda longe da definitiva, Wallace et al. (1993) formularam uma interessante conjectura segundo a qual as variabilidades atmosféricas, numa escala temporal interdecadal (segundo eles, superiores a cinco anos), são espacialmente hemisféricas, o que os levou à proposição do conceito de campo de fundo ("background field") em oposição ao de padrão de teleconexão, este apresentando centros regionais de ação e para o qual a heterogeneidade espacial tem contribuição decisiva (escala temporal da ordem de meses a poucos anos). Eles interpretaram esses padrões dominantes de teleconexões como sendo assinaturas de processos dinâmicos da atmosfera-oceano e o campo de fundo como uma resposta termodinâmica a perturbações no campo de radiação e/ou no balanço de energia na superfície. Assim, não seria surpreendente encontrar padrões de variabilidade similares nos rios Paraguai e Negro em escalas iguais ou maiores que dez anos. Seria, também, explicável porque tantos fenômenos geofísicos diferentes possuem a mesma escala de variabilidade de dez a onze anos. Por outro lado, variabilidades que ocorrem em escalas temporais mais curtas, dentre as quais se incluem aquelas correlacionadas com o El Niño, devem ser qualitativamente diferentes, o que explica o fato de se encontrar associação entre a flutuação da cota do rio Negro e um índice de oscilação Sul (Richey et al., 1989), mas não entre este e o nível do rio Paraguai, embora ambos apresentem flutuações nas escalas próximas a dois anos.

Um outro aspecto importante, a ser abordado sobre o sinal da cota do rio Paraguai, é o da detecção de variações bruscas no mesmo. São raros os estudos hidrometeorológicos que tiveram por objetivo principal analisar estes fenômenos. Todavia, com o advento da TO, foi possível determinar métodos precisos de identificação de singularidades isoladas

(Mallat & Hwang, 1992) a partir da análise em tempo-escala da fase do sinal (Weng & Lau, 1994). Tendo em vista a utilização destes métodos, a Fig. 3b mostra a variação da fase do sinal do rio Paraguai em tempo e escala. Nesta Figura, a fase local é indicada por uma cor, que é vermelha ou azul, dependendo de o seu valor estar mais próximo de $\pi/2$ ou de $-\pi/2$, respectivamente. Em cada escala, da esquerda para a direita, a fase aumenta com o tempo até atingir o valor π , quando então volta a variar a partir do valor $-\pi$. Um gráfico assim construído permite a definição de isolinhas de fase para cada ciclo e para as diferentes escalas resolvidas pelo diagrama. Seguindo este procedimento utilizado por Weng & Lau (1994), é possível estudar a variabilidade do nível do rio Paraguai de um novo ponto de vista. Assim, na Fig. 3b, podem-se apontar algumas regiões em que as isolinhas de fase convergem com a diminuição da escala (aumento da frequência). Estas regiões são indentificadas por setas e linhas verticais inscritas sobre a Figura e correspondem aproximadamente aos anos de 1909, 1912, 1916, 1920, 1927, 1936, 1940, 1950, 1961, 1973 e 1986 (ocorrências após esta data são dificilmente detectáveis).

Exceto nos intervalos de tempo verificados entre 1912 e 1916 e entre 1920 e 1927, quando houve aumento significativo do nível do rio, nos demais intervalos, ou seja, 1909-1912, 1936-1940 e, principalmente, 1961-1973, o nível do rio Paraguai apresentou prolongadas reduções de seu nível bem como da variância de suas flutuações. É interessante mencionar que o período entre 1960 e 1970 correspondeu aos valores mais elevados da maior parte dos índices de vulcanismo global no Hemisfério Sul (Robock & Free, 1995). Ademais, o seu índice, associado a registros de deposição de sulfatos de sais não marinhos em amostras de gelo na Península Antártica (76°S), apresentou valores elevados também nos períodos de 1909-1912 e 1936-1940. Os aerossóis destes sulfatos são altamente refletores e reduzem o fluxo de energia solar incidente na superfície, produzindo um resfriamento na Amazônia e no Nordeste do Brasil e provocando estacionalidade da ZCAS ao norte, fora da bacia do Rio Paraguai. Nestas condições, as chuvas caem sobre os afluentes do rio Solimões e Manaus apresenta pico de cheia, enquanto o rio Paraguai sofre secas.

Schertzer & Lovejoy (1991) sugerem que a singularidade detectada em um sinal geofísico separe regiões em que existam fortes interações entre diversas escalas de outras em que tal efeito é restrito ou inexistente. Efetivamente, a observação da Fig. 1b sugere que as singularidades aí detectadas separam períodos com padrões qualitativamente distintos de interações entre escalas e com características estatísticas diversas. Assim, as singularidades separariam porções do sinal com padrões de ordem particulares. Neste sentido, uma questão interessante a mencionar é a da eventualidade da modulação das flutuações do nível do rio nas escalas menores pelas maiores, nesses intervalos de tempo. Este é um problema que dificilmente é abordado na literatura e que evidencia uma das grandes vantagens da utilização da TO no lugar dos métodos tradicionais de análise do sinal. Ele oferece um domínio novo de pesquisa, o qual será explorado em trabalhos futuros. Uma conclusão importante, inferida ao se comparar a Fig. 3b com a 3a, é a de que quando há singularidades, as variações bruscas parecem ocorrer em grande parte das escalas analisadas, o que oferece um critério de previsibilidade das mudanças dramáticas.

Estudos sistemáticos das séries de dados hidrometeorológicos da região do Pantanal devem ser levados a cabo, a fim de aprofundar as questões discutidas anteriormente. Todavia, fica patente a importância da utilização da TO na análise de sinais geofísicos, pois ela possibilita a elaboração de uma nova concepção sobre a variabilidade do sinal não-estacionário, que se organiza num novo espaço de investigação (tempo-escala), apontando interações entre escalas e introduzindo a fase como um elemento de análise importante.

CONCLUSÕES

1. Mostra-se que a ondeleta complexa de Morlet é um instrumento de investigação adequado para estudar a variabilidade da parte real e da fase da série de cotas do alto rio Paraguai medidas diariamente em Ladário, MS, de 1900 a 1995. Ela detecta, também, as escalas em que o sinal apresenta maior variabilidade.

O estudo indica que estas são a anual (permanente), a de 2-5 anos (transiente) e a decadal (persistente), no intervalo de escalas permitido pelas condições de amostragem do sinal disponível (1 mês a 20 anos).

2. Demonstra-se que o sinal do rio Paraguai é composto por oscilações periódicas, permanentes, e por oscilações transientes, cujo período varia ou mesmo se extingue com o tempo.

3. Aplica-se a nova técnica de detecção de singularidades possibilitada pela TO para separar as regiões do sinal onde os padrões de variabilidade são diferentes, as quais são numerosas no caso do rio Paraguai. As singularidades detectadas se posicionam claramente delimitando regiões com variabilidades distintas.

4. Formulam-se conjecturas sobre o caráter geofísico das flutuações detectadas. Segundo as mesmas, a variabilidade do nível do rio é atribuída tanto a processos internos do sistema oceano-atmosfera quanto a fatores externos a ele. Não se ignora, todavia, a considerável transformação no uso do solo que a bacia do Rio Paraguai sofreu no período em estudo. Ela pode ter tido papel importante na definição de alguns dos padrões de variabilidade encontrados.

5. Finalmente, este é um estudo preliminar referente ao nível de um único rio, medido apenas em um ponto. Investigações posteriores deverão analisar outros dados hidrológicos brasileiros, a fim de precisar o grau de generalidade dos resultados aqui obtidos.

AGRADECIMENTOS

À FAPESP (processo nº 93/2715-1) e ao CNPq-RHAE (contrato nº 610197/94-0) pelo financiamento da pesquisa; ao Sr. Alexandre Guirland Nowosad pela ajuda na elaboração do Abstract; aos Drs. Antonio Ocimar Manzi e Vadlamudi Brahmananda Rao pelas críticas construtivas; ao Dr. Aimé Druilhet que cedeu gentilmente o programa utilizado nas análises; à Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária e ao Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica, que forneceram os dados referentes ao nível do rio Paraguai; e ao revisor anônimo pelas críticas e sugestões.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, M.R.; SMITH, L.A. Investigating the origins and significance of low frequency modes of climate variability. **Geophysical Research Letters**, Washington, v.21, n.10, p.883-886, May 1994.
- BARNETT, T.P. The interaction of multiple time scales in the tropical climate system. **Journal of Climate**, Boston, v.4, n.3, p.269-285, Mar. 1991.
- CADAVID GARCÍA, E.A.; CASTRO, L.H.R. Análise da frequência de chuva no Pantanal Mato-Grossense. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.21, n.9, p.909-925, Set. 1986.
- CURRIE, R.G.; O'BRIEN, D. Periodic 18.6-year and cyclic 10 to 11 year signals in Northeastern United States precipitation data. **International Journal of Climatology**, Birmingham, v.8, n.3, p.255-281, May/June 1988.
- DARCH, J.P. A study of moisture conditions in the Pantanal of Brazil using satellite imagery. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.8, n.4, p.331-348, 1979.
- DIAS, P.L.S.; SHUBERT, L.W.; MARIA, M. de. Large scale response of the tropical atmosphere to transient convection. **Journal of the Atmospheric Sciences**, Boston, v.40, n.11, p.2689-2707, Nov. 1983.
- FARGE, M. Wavelet transforms and their applications to turbulence. **Annual Review of Fluid Mechanics**, Palo Alto, v.24, p.395-457, 1992.
- FIGUEROA, S.N.; NOBRE, C.A. Precipitation distribution over Central and Western Tropical South America. **Climanálise**, São José dos Campos, v.5, n.6, p.36-45, June 1990.
- GABOR, D. Theory of communication. **Journal of the Institute of Electrical Engineering**, London, v.93, p.429-457, 1946.
- GAMAGE, N.; BLUMEN, W. Comparative analysis of low-level cold fronts: wavelet, Fourier, and empirical orthogonal function decompositions. **Monthly Weather Review**, Boston, v.121, n.10, p.2867-2878, Oct. 1993.
- GASQUET, C.; WITOMSKI, P. **Analyse de Fourier et Applications**. Paris: Masson, 1990. 354p.
- GROSSMANN, A.; KRONLAND-MARTINET, R.; MORLET, J. Reading and understanding continuous wavelet transforms. In: COMBES, J.M.; GROSSMANN, A.; TCHAMITCHIAN, P. (Eds.). **Wavelets**. Berlin : Springer-Verlag, 1989. p.2-20.
- GU, D.; PHILANDER, S.G.H. Secular changes of annual and interannual variability in the tropics during the past century. **Journal of Climate**, Boston, v.8, n.4, p.864-876, Apr. 1995.
- JAMES, I.N.; ANDERSON, D.L.T. The seasonal mean flow and distribution of large-scale systems in the southern hemisphere: effects of moisture transports. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, Reading, v.110, n.466, p.943-966, Oct. 1984.
- KERR, R.A. A now dawn for sun-climate links? **Science**, Washington, DC, v.271, n.5254, p.1360-1361, Mar. 1996.
- KLEEMANN, R. A modelling study of the effect of the Andean Mountains on the summertime circulation of the tropical South America. **Journal of the Atmospheric Sciences**, Boston, v.46, n.21, p.3344-3362, Nov. 1989.
- LAU, K.-M.; SHEU, P. Annual cycle QBO and Southern oscillation in global precipitation. **Journal of Geophysical Research: series D**, Washington, DC, v.93, n.9, p.10975-10988, Sept. 1988.
- LAU, K.-M.; WENG, H. Climate signal detection using wavelet transform: how to make a time series sing. **Bulletin of the American Meteorological Society**, Boston, v.76, n.12, p.2391-2402, Dec. 1995.
- MALLAT, S.; HWANG, W.L. Singularity detection and processing with wavelets. **IEEE Transactions on Information Theory**, New York, v.38, n.2, p.617-643, Mar. 1992.
- MANN, M.E.; LALL, U.; SALTZMANN, B. Decadal-to-centennial-scale climate variability: insights into the rise and fall of the Great Salt Lake. **Geophysical Research Letters**, Washington, DC, v.22, n.8, p.937-940, Apr. 1995.
- MARENGO, J.A. Variations and change in South American streamflow. **Climatic Change**, Dordrecht, v.31, n.1, p.99-117, Sept. 1995.
- MEYER, Y. **Ondelettes et opérateurs**. Paris: Hermann, 1990. v.1, 215p.

- NISHIZAWA, T.; TANAKA, M. Annual change in the tropospheric circulation and the rainfall in South America. **Archives for Meteorology, Geophysics, and Bioclimatology: series B**, Wien, v.33, n.1/2, p.107-116, 1983.
- NOBRE, C.A.; PAIÃO, L.B.F.C.; AMENDOLA, M. **Análise espectral das cotas do rio Negro em Manaus**. São José dos Campos: INPE, 1984. 16p. (Relatório Técnico INPE).
- RAO, V.B.; HADA, K. Characteristics of rainfall over Brazil: annual variations and connections with the Southern oscillation. **Theoretical and Applied Climatology**, Wien, v.42, n.2, p.81-91, 1990.
- RICHEY, J.E.; NOBRE, C.A.; DESER, C. Amazon River discharge and climate variability: 1903 to 1985. **Science**, Washington, DC, v.246, n.4926, p.101-103, Oct. 1989.
- ROBOCK, A.; FREE, M.P. Ice cores as an index of global volcanism from 1850 to the present. **Journal of Geophysical Research: series D**, Washington, DC, v.100, n.6, p.11549-11568, June 1995.
- ROBOCK, A.; MAO, J. The volcanic signal in surface temperature observations. **Journal of Climate**, Boston, v.8, n.5, p.1086-1103, May 1995.
- SCHERTZER, D.; LOVEJOY, S. Nonlinear geodynamical variability: multiple singularities, universality and observables. In: SCHERTZER, D.; LOVEJOY, S. (Eds.). **Non-linear variability in Geophysics**. Dordrecht: Kluwer, 1991. p.41-82.
- SILVA, J.S.V. **Aplicações de técnicas de sensoriamento remoto e sistema de informações geográficas na avaliação da dinâmica de inundação no Pantanal**. São José dos Campos : INPE, 1991. 139p. Dissertação de Mestrado.
- TUCCI, C.E.M. Controle de enchentes. In: TUCCI, C.E.M. (Ed.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: UFRGS, 1993. Cap.16, p.621-658.
- VIRJI, H.A. Preliminary study of summertime tropospheric circulation patterns over South America estimated from cloud winds. **Monthly Weather Review**, Boston, v.109, n.3, p.599-610, Mar. 1981.
- XU, J.-S. On the relationship between the stratospheric quasi-biennial oscillation and the tropospheric southern oscillation. **Journal of the Atmospheric Sciences**, Boston, v.49, n.9, p.725-734, May 1992.
- WALLACE, J.M.; ZHANG, Y.; LAU, K.-H. Structure and seasonality of interannual and interdecadal variability of the geopotential height and temperature fields in the Northern Hemisphere troposphere. **Journal of Climate**, Boston, v.6, n.11, p.2063-2082, Nov. 1993.
- WENG, H.; LAU, K.-M. Wavelets, period doubling, and time-frequency localization with application to organization of convection over the Tropical Western Pacific. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v.51, n.17, p.2523-2541, Sept. 1994.