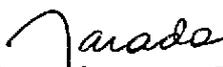


1. Publicação nº <i>INPE-3109-PRE/508</i>	2. Versão <i>2ª versão *</i>	3. Data <i>Maio, 1984</i>	5. Distribuição <input type="checkbox"/> Interna <input checked="" type="checkbox"/> Externa <input type="checkbox"/> Restrita
4. Origem <i>DME/DMP</i>	Programa <i>TECLIM</i>		
6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) <i>CHUVAS DE FORTALEZA</i> <i>MODELO DE PREVISÃO</i> <i>ANÁLISE ESTATÍSTICA</i>			
7. C.D.U.: <i>551.577.38(812/814)</i>			
8. Título <i>PREVISÃO DE SECAS NO NORDESTE PELO MÉTODO DAS PERIODICIDADES: USO E ABUSOS (versão resumida)</i>		<i>INPE-3109-PRE/508</i>	10. Páginas: <i>18</i>
9. Autoria <i>Carlos Afonso Nobre Horacio H. Yanasse Corina C.F. Yanasse</i>			11. Última página: <i>16</i>
Assinatura responsável 			12. Revisada por  <i>L.C. Motion</i>
			13. Autorizada por  <i>Nelson de Jesus Parada</i> Diretor'Geral
14. Resumo/Notas <i>Apresenta-se uma análise estatística da longa série dos totais anuais de precipitação de Fortaleza, Ceará (1849-1978). Vários testes estatísticos aplicados à série mostraram que os dados não podem ser considerados não-correlacionados ao nível de 95% de confiabilidade. Comprovou-se a existência de duas periodicidades, estatisticamente significativas, com períodos de aproximadamente 13 e 26 anos. Com base nessas periodicidades, formulou-se um modelo de previsão do total anual de chuva para Fortaleza. Estas duas periodicidades explicaram somente 24% da variância da série. Várias limitações deste modelo de previsão foram discutidas. Concluiu-se que o grau de incerteza no prognóstico de secas no Nordeste do Brasil pelo método das periodicidades, é alto; portanto qualquer previsão dada por tal modelo deve ser analisada com muita cautela.</i>			
15. Observações <i>Este trabalho será submetido para apresentação no 6º Simpósio Nacional de Probabilidade e Estatística (SINAPE), a ser realizado de 23 a 27/07/84, RJ. *Versão revisada em maio de 1985.</i>			

ABSTRACT

Statistical analysis of Fortaleza, Ceará, Brazil rainfall series is presented (1849 - 1978). Several tests for white noise showed that the series is not uncorrelated at 95% confidence level. Periodicities of approximately 13 and 26 years were found to be statistically significant. A forecasting model based on these periodicities was built. It is seen that the two periodicities explained only 24% of the series' variance. Several limitations of such a forecasting model were discussed. It was concluded that the uncertainties involved in drought forecasting in northeastern Brazil based on this model are high. Therefore it is recommended that these drought forecasts be viewed with great care.

PREVISÃO DE SECAS NO NORDESTE PELO MÉTODO DAS PERIODICIDADES:
USO E ABUSOS

Carlos Afonso Nobre*, Horacio H. Yanasse*, Corina C.F. Yanasse**

*Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico-CNPq
Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12200 - São José dos Campos - SP - Brasil

**Escola Educação Infantil 1º Grau Monteiro Lobato SC Ltda.
12200 - São José dos Campos - SP - Brasil

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho é uma versão resumida de um trabalho desenvolvido por Nobre et alii (1982). Este estudo da série dos totais anuais de precipitação de Fortaleza, Ceará, para o período 1849-1978, tem o intuito principal de dirimir dúvidas levantadas por estudos anteriores (Markhan, 1974; Jones and Kearns, 1976; Girardi e Teixeira, 1978; e Strang, 1979) no que tange à possibilidade de utilização de periodicidades aparentes, observadas nesta série, para a previsão de secas no Nordeste do Brasil (NE).

Acredita-se que o estabelecimento de um modelo operacional de prognóstico de estação chuvosa deficiente ou em excesso, com previsões fornecidas com antecedência de pelo menos alguns meses em relação aos meses de maior precipitação, serviria ao propósito do governo e de particulares de se precaverem e de planejarem medidas destinadas a minorar os efeitos adversos, tantas vezes devastadores, das grandes estiagens e inundações sobre a população e economia locais.

O sucesso alcançado até o presente na previsão deste fenômeno meteorológico tem sido bastante modesto, se medido pelo critério de 80% de acerto nas previsões, de acordo com a citação de Walker (1928). Entretanto, estudos recentes (Markhan and McLain, 1977; Hastenrath and Heller, 1977; Moura and Shukla, 1981; Nobre, no prelo), que procuram investigar as causas físicas da variabilidade das chuvas do NE, têm fornecido indícios de que talvez se torne realidade, num futuro não muito distante, a utilização de um modelo de previsão operacional e confiável. Padrões típicos de anomalia

lia de Temperatura de Superfície do Mar (TSM) no Atlântico Tropical e do escoamento atmosférico em escala global parecem indicar a possibilidade de dizer, em novembro ou dezembro de um dado ano, se as chuvas de "inverno" (referentes aos meses de Março, Abril e Maio, no Norte e Nordeste do Brasil) do próximo ano têm alta probabilidade de ser abundantes, escassas ou próximas à média para a região semi-árida do NE.

A variabilidade espacial e temporal da chuva no NE é enorme (veja-se, por exemplo, Strang 1972; Hastenrath and Heller 1977, e Kousky (1979, 1980a). Para efeito deste estudo a anomalia de precipitação será entendida como aquela pertinente à região setentrional do NE, sendo o Estado do Ceará um representante típico desta área. As conclusões deste trabalho, portanto, não devem necessariamente ser válidas para regiões do NE sujeitas a outros regimes pluviométricos. Até mesmo para regiões sujeitas ao mesmo regime que Fortaleza, deve-se ter cuidado quanto à extrapolação de conclusões, dada a variabilidade natural dos dados de precipitação de um local para outro.

A abordagem do problema das causas físicas das anomalias de precipitação no NE pode ser subdividida. Por um lado, faz-se necessário explicar porque a região é semi-árida na média e, por outro lado, o porquê da alta variabilidade interanual da precipitação na região. Apesar de a grande variabilidade temporal das chuvas ser, em grande parte, reflexo do fato da região ser semi-árida, as causas físicas da semi-aridez não são necessariamente as mesmas responsáveis pela grande variabilidade das chuvas de um ano para outro. Enquanto um número razoável de estudos focalizou a questão mais premente da variabilidade temporal das chuvas, pouca atenção tem sido dada à questão da climatologia do NE. Nesse sentido, constituem exceção os estudos de Gomes Filho (1979) e Nobre (1983).

Os primeiros esforços para o estabelecimento de um método objetivo para a previsão científica das secas no NE datam do primeiro quarto deste século. Walker (1928) desenvolveu uma fórmula estatística para a previsão do índice de chuvas no Ceará. O método baseia-se na análise de regressão múltipla do índice de chuva sazonal (janeiro a junho), medido através da média ponderada das precipitações de Fortaleza e Quixeramobim (esta última localizada no interior do Ceará). Tal método utilizou dados meteorológicos de pon

tos distantes para períodos que antecedem a estação de chuvas no NE; estes dados têm correlações significativas com o índice de chuvas sazonal no Ceará. Walker não considerou o método satisfatório por produzir boas previsões de seca em 60% dos casos, uma vez que recomendava um nível de acerto de no mínimo 80% para colocar o método em prática.

Sampaio Ferraz (1929 a e b) e Serra (1956) aprofundaram a fórmula estatística de Walker e sugeriram interpretações físicas às correlações. É interessante especular que o fato de estas investigações terem mostrado correlações estatisticamente significantes da chuva de inverno do Ceará, com dados meteorológicos de pontos distantes - Santiago, Honolulu, Atlântico Sul e Sul do Continente Africano (no trabalho de Walker), pode ser indicativo de que as anomalias de precipitação no NE talvez sejam manifestação de fenômenos meteorológicos de grande escala. Apesar de serem necessários muitos outros estudos para verificar esta hipótese, vários trabalhos publicados apontam nesta direção (Namias, 1972; Markhan and McLain, 1977; Hastenrath and Heller, 1977; e Moura and Shukla, 1981).

Sampaio Ferraz (1950) descobriu a existência de periodicidades aparentes na série de dados de chuva de Fortaleza. Utilizando os totais anuais de precipitação para o período de 1849-1948, ele achou periodicidades de 13 a 24 anos aproximadamente. Procurou explicar tal comportamento, aparentemente periódico, como resposta da atmosfera às quase-periodicidades da atividade solar. Com base nos ciclos encontrados, arriscou a previsão de uma "grande seca" para meados da década de 50.

Nesta mesma linha de pesquisa Markhan (1974), que possivelmente não estava a par do trabalho de Sampaio Ferraz (1950), analisou os totais anuais da chuva de Fortaleza para um período de 121 anos (1850-1970) e achou periodicidades de aproximadamente 13 e 26 anos, estatisticamente significativas ao nível de 1%. Jones e Kearns (1976), numa crítica ao trabalho de Markhan (1974), mostraram que essa série não é significativamente diferente de ruído branco ao nível de 5%. Girardi e Teixeira (1978), com base nessas periodicidades aparentes de 13 e 26 anos, prognosticaram um período de chuva escassa entre os anos de 1979 a 1985, com tendência a ocorrência de seca.

Strang (1979) buscou estabelecer uma relação entre a suposta periodicidade de 13 anos da série de chuva em Fortaleza com a Oscilação Quase-Bienal (OQB) dos ventos zonais da estratosfera tropical. Sugeriu a interação da OQB com o ciclo anual para explicar o ciclo de 13 anos e especulou que a causa da variabilidade temporal da chuva no NE poderia residir nos atrasos e adiantamentos críticos da OQB.

Tendo em vista uma possível explicação física da variabilidade das chuvas no NE, diversos estudos apontaram e identificaram elementos meteorológicos que poderiam servir à previsão. Markhan e McLain (1977) propuseram o monitoramento da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) no Atlântico Sul Tropical como possível elemento predictor do regime sazonal das chuvas no NE; Hastenrath e Heller (1977) sugeriram o monitoramento da expansão das altas quase-permanentes do Atlântico Norte e Sul em direção ao Equador, da localização de bandas de precipitação e nebulosidade sobre o Atlântico Tropical adjacente ao NE, e das chuvas de pré-estação (janeiro e fevereiro) no NE e nas Guianas, para a previsão da qualidade da estação chuvosa no NE. Moura e Shukla (1981) mostraram que, para anos extremos de seca ou de muita chuva no NE, a distribuição espacial das anomalias da TSM, abrangendo grande porção do Atlântico Tropical Norte e Sul, exhibe padrões característicos e bem delineados. Dada a persistência destas anomalias de TSM, que para anos extremos como 1958 (seca) e 1964 (chuvas superabundantes) já eram claramente identificáveis vários meses antes do mês de pico de precipitação, há razões para otimismo quanto à viabilidade da previsão de eventos extremos de chuva para o NE. Nobre (no prelo) mostrou que há padrões anômalos característicos em escala global para anos de seca e de chuvas em excesso. Recentemente, Brito (no prelo) analisou a seca de 1983, por ele considerada a maior dos últimos 20 anos, e concluiu que este evento extremo parece estar relacionado com o forte El Niño - Oscilação do Sul, ocorrido em 1982/83.

2. PREPARAÇÃO DOS DADOS

Os totais mensais de chuva para Fortaleza foram obtidos através da publicação de Strang (1979) para o período de 1849-1910 e dos sumários mensais de dados meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET (não publicados) para o restante do período.

do de 1911 a 1978. Este conjunto de dados difere significativamente da série utilizada por Markhan (1974) e Jones e Kearns (1976), e é importante salientar que tais diferenças modificaram os resultados da análise estatística. A série utilizada nesses estudos anteriores é particularmente incorreta para as décadas 1891-1900, 1911-1920 e 1961-1970. Acredita-se que a série ora analisada representa a melhor compilação dos dados de chuva de Fortaleza (Kousky e Meira Filho, 1980). Esta série é basicamente a mesma utilizada por Girardi e Teixeira (1978) e Strang (1979), diferindo somente em alguns poucos valores. Ela contém 1560 totais mensais sucessivos de precipitação pluviométrica para Fortaleza (novembro de 1948 a outubro de 1978) faltando para 9 meses. Tais lacunas foram preenchidas com as médias mensais para o período total de 130 anos (1849-1978). A estação chuvosa se estende de janeiro a junho, e nesse período caem em média quase 90% do total anual. Março, abril e maio são os meses que recebem o maior volume de chuvas, sendo os responsáveis, em média, por 60% da precipitação anual. Agosto, outubro e novembro são meses praticamente sem chuvas. Para efeito de comparação com outros estudos, considerar-se-ã aqui os totais de chuva para o ano hidrológico, que se estende de novembro de um dado ano a outubro do próximo (um dado ano é aquele que contém a estação chuvosa). Totais mensais de 1849 a 1978 podem ser obtidos em Nobre et alii (1982). Os totais anuais estão listados na Tabela 1.

TABELA 1

TOTAIS ANUAIS DE PRECIPITAÇÃO PARA FORTALEZA - 1849-1978
(ANO HIDROLÓGICO: NOVEMBRO A OUTUBRO)

ANO	PREC.	Z												
1849	2043	1,25	1859	1485	0,11	1869	1498	0,14	1879	570	-1,76	1889	765	-1,36
1850	838	-1,22	1860	1646	0,44	1870	1586	0,32	1880	1512	0,17	1890	1521	0,18
1851	1750	0,65	1861	1277	-0,32	1871	1332	-0,20	1881	1461	0,06	1891	1097	-0,68
1852	1362	-0,14	1862	1679	0,51	1872	2343	1,87	1882	1247	-0,38	1892	1017	-0,85
1853	1256	-0,36	1863	1437	0,01	1873	1992	1,15	1883	1521	0,18	1893	1532	0,21
1854	1634	0,42	1864	1129	-0,62	1874	1592	0,33	1884	1007	-0,87	1894	2533	2,26
1855	1196	-0,48	1865	1233	-0,41	1875	1485	0,11	1885	1327	-0,21	1895	2504	2,20
1856	1734	0,62	1866	2453	2,09	1876	1693	0,54	1886	1399	-0,07	1896	2200	1,58
1857	1848	0,85	1867	864	-1,16	1877	483	-1,94	1887	1342	-0,18	1897	1827	0,81
1858	1292	-0,28	1868	1263	-0,34	1878	511	-1,89	1888	725	-1,45	1898	859	-1,17

(continua)

ANO	PREC.	Z												
1899	2434	2,06	1913	508	-1,89	1931	1167	-0,54	1947	1697	0,55	1963	1883	0,93
1900	746	-1,40	1916	1230	-0,41	1932	882	-1,13	1948	1611	0,37	1964	2653	2,50
1901	1733	0,62	1917	2108	1,39	1933	914	-1,06	1949	1875	0,91	1965	1636	0,42
1902	870	-1,15	1918	1373	-0,12	1934	1745	0,64	1950	1046	-0,79	1966	1271	-0,33
1903	797	-1,30	1919	683	-1,53	1935	1809	0,77	1951	692	-1,51	1967	1856	0,87
1904	1142	-0,59	1920	1768	0,69	1936	829	-1,23	1952	1463	0,07	1968	1348	-0,17
1905	1196	-0,48	1921	2481	2,15	1937	1300	-0,27	1953	1007	-0,75	1969	1848	0,85
1906	1427	-0,01	1922	1623	0,39	1938	1570	0,28	1954	1032	-0,82	1970	1139	-0,60
1907	695	-1,51	1923	1580	0,31	1939	1911	0,98	1955	1055	-0,77	1971	2102	1,38
1908	833	-1,23	1924	1758	0,67	1940	1459	0,06	1956	905	-1,08	1972	1427	-0,01
1909	907	-1,07	1925	1212	-0,45	1941	925	-1,04	1957	1209	-0,45	1973	2151	1,48
1910	2022	1,21	1926	1584	0,31	1942	960	-0,97	1958	519	-1,87	1974	2560	2,31
1911	1488	0,12	1927	1164	-0,58	1943	1006	-0,87	1959	1488	0,12	1975	1892	0,94
1912	2477	2,14	1928	1013	-0,86	1944	1120	-0,64	1960	992	-0,90	1976	1503	0,15
1913	1870	0,90	1929	1240	-0,39	1945	1758	0,67	1961	1697	0,55	1977	1997	1,16
1914	1603	0,35	1930	1080	-0,72	1946	1677	0,50	1962	1310	-0,25	1978	1459	0,06

Z = [TOTAL ANUAL DE PRECIPITAÇÃO - MÉDIA DO PERÍODO 1849-1978 (1431 mm)]/[DESVIO-PADRÃO (488 mm)]

3. TESTES ESTATÍSTICOS

Os testes que se seguem verificam se os dados não são correlacionados, ou seja, testam a hipótese de que os dados sejam um ruído branco.

a) *Teste das autocorrelações para ruído branco* - Para a série de precipitações em Fortaleza tem-se que a maior correlação (em módulo) é a de "lag" 1, cujo valor é 0,231. Este valor excede o valor crítico de 0,172 correspondente a um nível de significância de 0,05. Portanto, rejeita-se a hipótese de que a série é um ruído branco. Ressalta-se que o fato de a correlação de "lag" 1 ser diferente de zero pode indicar que a série possui memória, ou seja,

uma correlação de ano a ano ou talvez uma periodicidade. Assim sendo, existe a possibilidade de que a série aqui estudada contenha persistência.

b) *Teste Kolmogorov-Smirnov para ruído branco, baseado no período grama* - Com base na hipótese de que a série de tempo é um ruído branco, a integral do espectro é uma função linear da frequência. Assim sendo, o periodograma cumulativo normalizado tem a mesma distribuição da função de distribuição de uma amostra ordenada de mesmo tamanho, selecionada a partir de uma distribuição uniforme entre 0 e 1. Para o nível de significância de 5% o valor crítico é dado por $1,36/\sqrt{n}$. A Figura 1 apresenta o periodograma cumulativo, normalizado para os dados de precipitação, e as bandas a 95%. Como pode ser visto, vários pontos do periodograma cumulativo excedem o limite superior. Rejeita-se, pois, a hipótese de que a série seja um ruído branco.

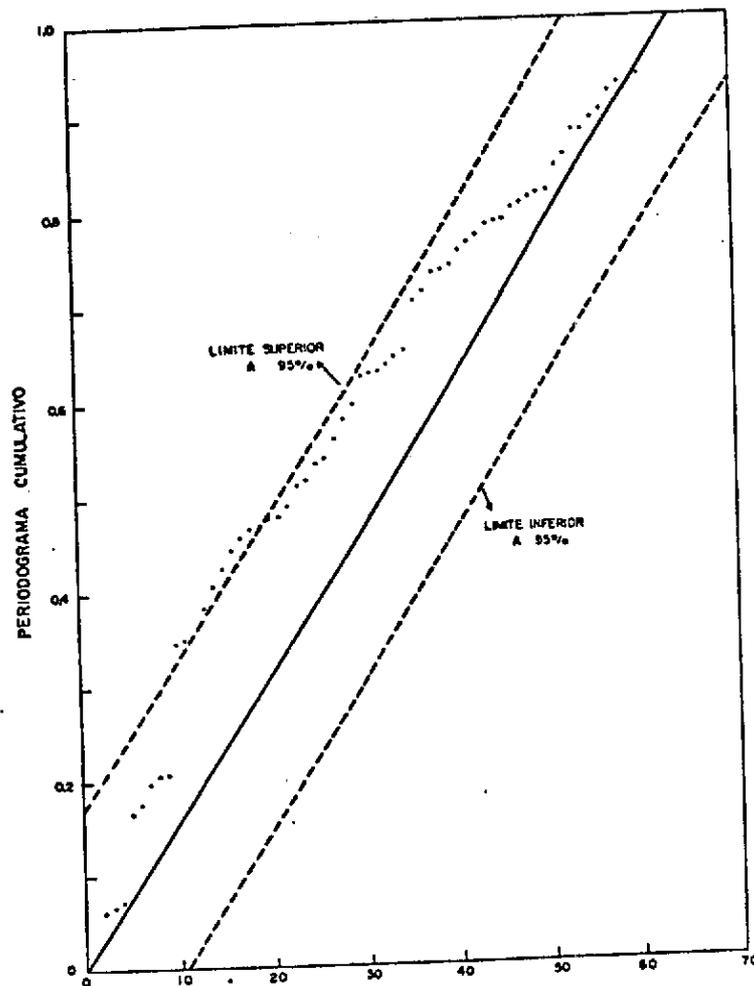


Fig. 1 - Periodograma cumulativo para o teste de Kolmogorov-Smirnov para ruído branco.

c) *Teste de Fisher* - O teste de Fisher (Bloomfield, 1976) testa a hipótese da existência de uma componente periódica. Este teste foi expandido por vários autores para incluir o r-ésimo maior pico do periodograma (veja-se Shimshoni, 1971). Para a série de precipitações de Fortaleza os valores obtidos para $G(1)$, $G(2)$ e $G(3)$, respectivamente, 1º, 2º e 3º maiores picos, são 0,133, 0,101 e 0,048. Por uma extrapolação linear dos valores tabelados por Shimshoni (1971) obtiveram-se, para um coeficiente de confiança de 95%, os valores críticos: 0,115, 0,082 e 0,065. Assim, existem duas periodicidades significativas que correspondem aos períodos de aproximadamente 13 e 26 anos.

d) *Teste para ruído branco usando o espectro estimado* - O espectro estimado em uma escala logarítmica e o espectro do ruído branco, baseado na variância dos dados, estão representados na Figura 2. Usando um limite de confiança de 99% a priori tem-se um limite de confiança de aproximadamente 87% a posteriori (veja-se WMO, 1966). Os limites de confiança superior e inferior também estão representados nesta figura. Como se pode ver, o limite inferior para o maior pico do espectro estimado excede o nível do ruído branco, indicando que a hipótese de que a série estudada seja um ruído branco é rejeitada ao nível de significância de 13%.

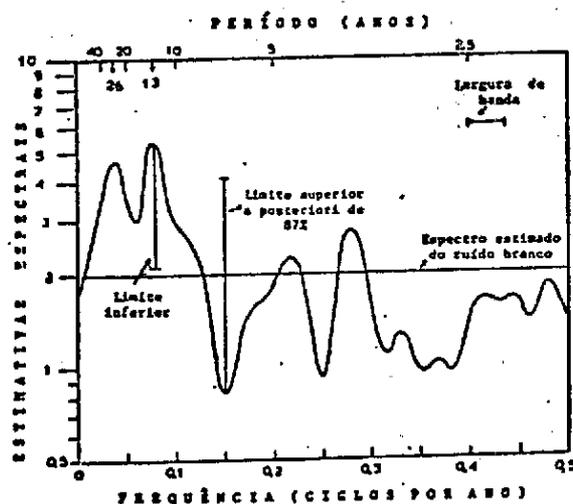


Fig. 2 - Estimativas espectrais suavizadas para a série dos totais anuais de precipitação de Fortaleza.

Limite de confiança de 87% a posteriori. As estimativas foram plotadas numa escala logarítmica. O espectro estimado do ruído branco (variância de dados) é indicado na figura. A largura de banda da janela de Parzen, de 0,037 foi escolhida de modo a discriminar as frequências de 1/13 e 1/26.

Como pode ser visto, os testes, sem exceção, rejeitaram a hipótese de que a série seja um ruído branco. Morettin et alii (1984) aplicaram vários testes estatísticos a esta mesma série obtendo resultados semelhantes. Assim sendo, procedeu-se à escolha de um modelo que melhor se ajustasse aos dados.

É interessante tecer considerações sobre a representatividade dos dados de chuva em Fortaleza, isto é, verificar se a chuva anual nesta cidade está bem correlacionada com a chuva anual de uma área mais ampla no NE. Isto porque se estuda o comportamento da série com vistas na possibilidade de sua utilização como elemento predictor da qualidade da estação chuvosa no NE. Em Nobre et alii (1982) é analisada com maiores detalhes a representatividade dos dados de Fortaleza. Chegou-se à conclusão de que a chuva em Fortaleza somente é representativa da chuva de área mais ampla do NE, em anos de seca pronunciada em toda região. Anos muito chuvosos na região como um todo nem sempre indicam muita chuva em Fortaleza, e anos de muita chuva nesta cidade não indicam claramente que toda a região experimentou chuvas abundantes. Isto provavelmente se deve ao fato de que as grandes secas estão ligadas a fenômenos físicos de larga escala, afetando o NE (exceção feita às áreas do sul da Bahia e nordeste de Minas Gerais que, por estarem sujeitas ao regime de chuvas de máximo em dezembro, podem ser menos afetadas pela falta das chuvas de março-abril). Nos anos muito chuvosos, por outro lado, a variabilidade espacial intrínseca aos sistemas convectivos age mais livremente, fazendo com que as correlações espaciais sejam menos significativas.

A conclusão de que a chuva anual em Fortaleza é típica de uma área maior do NE somente para anos de grande seca impõe uma limitação à previsão mais geral, utilizando-se exclusivamente a série de Fortaleza, qual seja, mesmo que o modelo hipoteticamente fornecesse previsões perfeitas para Fortaleza, estas somente poderiam ser estendidas com boa probabilidade para o NE como um todo, para anos de grande seca. Mesmo levando em conta que a previsão de anos muito chuvosos e até de anos de seca parcial, pelo modelo, não seria satisfatória, esta limitação não é crítica, pois é exatamente para anos de chuva extremamente escassa que há maior interesse em previsão. Em vista disso, prosseguiu-se com a análise, e na seção subsequente desenvolver-se-á um modelo de previsão baseado nas informações acumuladas até este ponto.

4. MODELO DE PREVISÃO

Como r_1 (autocorrelação de "lag" 1) é significativo pensou-se em duas razões para isto: em primeiro lugar que o processo gerador dos dados fosse um processo de Markov, isto é, que os dados somente tivessem simples persistência de ano para ano ("red-noise"), e, em segundo lugar, que os dados simplesmente contivessem periodicidades (modelo senoidal).

Procedeu-se ao ajuste dos modelos aos dados e analisaram-se os resíduos. Obteve-se o modelo auto-regressivo de ordem 1 (Markov):

$$X_t = \delta + \phi X_{t-1} + \varepsilon_t, \quad *$$

onde os estimadores de δ e ϕ são, respectivamente:

$$\hat{\delta} = (1-r_1) \bar{X} \approx 1096 ; \hat{\phi} = r_1 = 0,231$$

e $\bar{X} = 1431$ é a média amostral. A análise dos ruídos mostrou que estes podem ser considerados não-correlacionados (ruído-branco) e normalmente distribuídos.

O modelo senoidal é representado por:

$$X_t = \mu + A_1 \cos \omega_1 t + B_1 \sin \omega_1 t + A_2 \cos \omega_2 t + B_2 \sin \omega_2 t + \varepsilon_t,$$

onde:

$$\hat{\mu} = \bar{X} = 1431; \omega_1 = 2\pi/13; \omega_2 = 2\pi/26; \hat{A}_1 = -86,3; \hat{B}_1 = -243,0$$

$$\hat{A}_2 = -55,4; \hat{B}_2 = -204,5.$$

Os resíduos para esse modelo também podem ser considerados normais e não-correlacionados.

A variância dos resíduos para o modelo auto-regressivo é aproximadamente $(475)^2$, o que mostra que este modelo explica somente 5% da variância da série original $(488)^2$. Por outro lado, a variância dos resíduos do modelo senoidal é aproximadamente $(425)^2$, o que mostra que este modelo explica em torno de 24% da variância da série original. Como se vê, mesmo este modelo que explica uma porcentagem maior da variância em relação ao modelo auto-regressivo deixa a desejar, já que esta porcentagem é pequena. É razoável supor que r_1 é significativo, não pelo fato de a série ser proveniente de um processo de Markov, mas sim por ter periodicidades. Esta constatação serve como justificativa, na análise espectral

dá série, para o que se testou a respeito da significância das periodicidades contra a hipótese da série ser um ruído-branco e não originária de um processo de Markov ("red-noise").

A baixa porcentagem de variância, explicada pelo modelo senoidal, obviamente terá implicações no desempenho do modelo como previsor. Com isto em mente adotar-se-á experimentalmente o modelo senoidal para a previsão de eventos extremos da chuva em Fortaleza e verificar-se-á a eficiência do modelo, tomando como referência o nível de confiança de 80% para as previsões.

A Figura 3 sintetiza os resultados do ajuste com o modelo senoidal. O modelo senoidal com as frequências de 13 e 26 anos é representado pelas linhas cheias, juntamente com a série original. Os limites do intervalo de confiança de 80% são dados por $\hat{X}_t \pm 1,28 \hat{\sigma}_r$, onde \hat{X}_t são os valores estimados pelo modelo senoidal, e $\hat{\sigma}_r = 425$ é o desvio padrão dos resíduos. Estes limites foram calculados simetricamente em torno do valor estimado e estão representados pelas linhas tracejadas na Figura 3. Por exemplo, num dado ano, com 80% de confiança pode-se afirmar que o valor da precipitação cairá entre esses dois limites.

Para efeito de previsão de períodos de precipitação deficiente (ou em excesso) em Fortaleza é interessante estimar a probabilidade da precipitação anual estar abaixo (ou acima) da média. Os anos para os quais a precipitação anual cairá abaixo (ou acima) da média, com 80% ou mais de confiança, estão indicados por barras na parte inferior (superior) da Figura 3. Portanto, vê-se que somente quando a curva senoidal estiver na vizinhança do mínimo (máximo) é que se poderá afirmar que aquele ano terá estação chuvosa deficiente (ou em excesso), com 80% de confiança.

Ao nível de 80% de confiança este modelo de previsão indica apenas que, para os anos assinalados pelas barras, haverá precipitação anual abaixo (ou acima) da média; porém, não fornecerá indicações, a este nível de confiança, sobre a ocorrência de eventos ou totais de precipitação. Desejando-se prever a possibilidade de o total anual da chuva em Fortaleza ser inferior (ou superior) à média em um desvio padrão (1431 ± 425), o nível de confiança de cresceria para aproximadamente 50% para os anos nos quais a curva senoidal se encontrasse no mínimo (ou no máximo). Para os demais anos seria ainda menor.

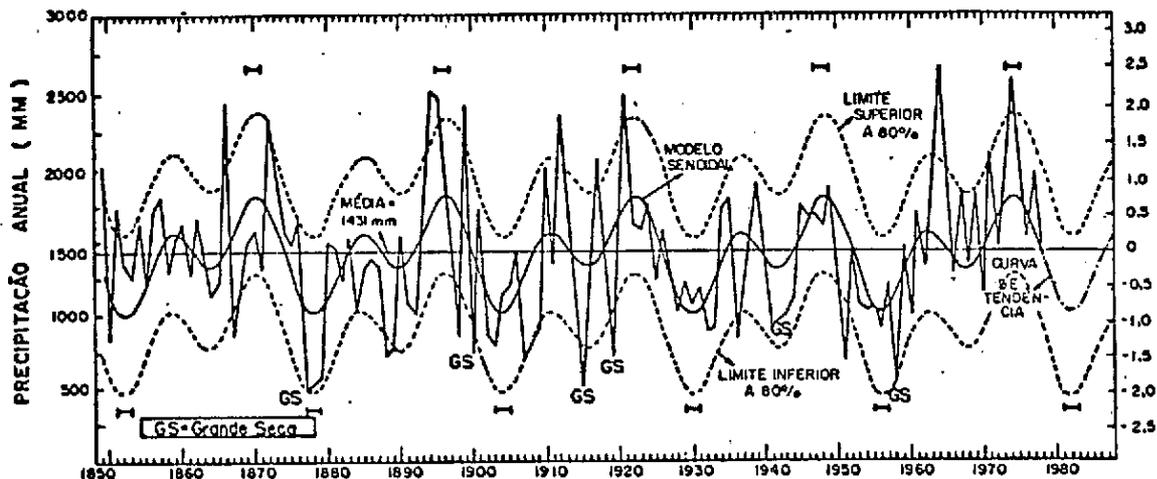


Fig. 3 - Totais anuais de precipitação para Fortaleza.

Dados do período 1849-1978 onde os totais anuais foram computados para o ano hidrológico (outubro a novembro). Modelo senoidal das periodicidades de 13 a 26 anos (linha cheia contínua) com limites de confiança simétricos ao nível de 80% (linha tracejada). A curva de tendência (prognóstico do modelo senoidal) é indicada para o período 1979-1988 (linha traço-ponto). As barras horizontais na parte inferior (superior) da figura indicam os anos para os quais o modelo prognosticaria precipitação abaixo (acima) da média, com 80% ou mais de confiança. GS=Grande Seca.

Conclui-se portanto que o modelo é bastante limitado no que diz respeito à previsão de valores que se afastam consideravelmente da média; por conseguinte, o modelo é de utilidade limitada para a previsão de grandes secas no NE, visto que, pelo histórico dos dados, nos anos das grandes secas o total anual de precipitação em Fortaleza sempre foi menor que 1000mm, e para este valor o nível de confiança é apenas 50% ou menor.

5. COMPARAÇÃO COM OUTROS ESTUDOS

Sampaio Ferraz (1950), notando que a extrapolação dos ciclos de 12,9 e 23,7 anos, detectados em seu estudo, resultava no mínimo da curva que ocorreu em meados da década de 50 e que o período de 7 ciclos solares (aproximadamente 78 anos), contados a partir da grande seca de 1877-1879, cairia em torno de 1956, previu a ocorrência de uma "grande seca" para meados daquela década, por credi

tar que as "grandes secas", aquelas que persistem por mais de um ano, estão separadas por aproximadamente 7 ciclos solares. Na década de 50, três secas assolaram o NE, duas parciais (1951 e 1953) e uma total (1958); porém, não ocorreu a "grande seca" que persiste por mais de um ano, prevista por Sampaio Ferraz.

Girardi e Teixeira (1978), com base na extrapolação dos ciclos de 13 e 26 anos, previram um período de 7 anos (1979 a 1985) de chuvas escassas, com tendência à ocorrência de seca. Definindo como alta probabilidade de ocorrência de um evento o valor 0,80, vê-se que, com base no modelo senoidal de previsão estudado, o máximo que se pode afirmar é que a precipitação cairá abaixo da média em 1981, 1982 e 1983, a este nível de confiança (a curva de tendência para o período 1978-1988 está indicada na Figura 3 pela linha traço-ponto). Brito (no prelo) verificou que no ano de 1983 ocorreu a maior seca dos últimos 20 anos, porém no ano de 1981 o total de precipitação foi acima da média.

A hipótese de que a anomalia de precipitação do NE pode estar ligada a OQB (Strang, 1979) merece alguma consideração. Não raro a análise espectral de parâmetros meteorológicos, até mesmo de latitudes médias, apresenta alguma tendência de oscilação, mesmo que fraca, entre 2 e 3 anos. Recentemente Nobre (1980) detectou periodicidade de aproximadamente 28 meses no espectro da série das cotas (nível d'água) do rio Negro em Manaus, na Região Amazônica.

Para testar se a série de Fortaleza apresenta alguma periodicidade na faixa de OQB construiu-se o espectro dos totais mensais, após o ciclo anual ter sido removido. Verificou-se que não há nenhum pico significativo em torno de 26 meses (período médio da OQB) nos dados de precipitação de Fortaleza.

6. LIMITAÇÕES DO MODELO DE PREVISÃO E CONCLUSÕES

O modelo de previsão apresenta quatro limitações principais. Em primeiro lugar há a questão da representatividade dos dados de Fortaleza. Viu-se, no entanto, que esta dificuldade é parcialmente reduzida se o interesse for unicamente na previsão de grandes secas no NE.

Em segundo lugar, o modelo senoidal, pela sua própria natureza periódica, só indicará a ocorrência de estação chuvosa deficitária para períodos alternados de 26 em 26 anos. Pela Figura 3 vê-se que as grandes secas de 1900, 1915, 1919 e 1942 não seriam previs

tas por este modelo. Com respeito a 1958 poder-se-ia afirmar somente que a precipitação seria abaixo da média, com 75% de confiança. Portanto, das 6 grandes secas desde 1900, o modelo não forneceria nenhuma indicação de seca para 4 delas.

A terceira limitação é que o modelo é incapaz de prever um ano com precipitação bem abaixo da média, por exemplo abaixo de 1000mm, com confiança de 80% ou superior.

A última limitação do modelo, aliás inerente a muitos modelos baseados unicamente em correlações estatísticas e periodicidades sem firme base física estabelecida, é que justamente por não se conhecerem as causas físicas dessas periodicidades não há garantia de que elas continuarão a existir no futuro, e este modelo de previsão baseia-se exatamente na suposição de que tais periodicidades continuarão a existir inalteradas no futuro.

Oscilações de longos períodos como 13 e 26 anos, se reais, devem ter origem em fenômenos de grande escala e, portanto, poderiam ser detectadas no espectro de outros elementos meteorológicos. Seria interessante analisar o espectro das TSMs do Atlântico Tropical e verificar a existência ou não de picos nas faixas de 13 e 26 anos, uma vez que as anomalias das TSMs naquela área estão significativamente correlacionadas com anomalias de precipitação no NE.

Concluindo, acredita-se que quaisquer prognósticos de secas, baseados nesse modelo de periodicidades, não justificaria um planejamento econômico e social extraordinário, visto o grau de incerteza de tais previsões. Nesse sentido, recomenda-se que métodos de previsão, sejam estatísticos ou de outra natureza, continuem a ser pesquisados, mas que estejam firmemente fundamentados em bases físicas.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BLOOMFIELD, P. (1976) *Fourier analysis of time series: an introduction*. New York, John Wiley, 258 p.
- BRITO, J.I.B. (no prelo) *Variações Interanuais da circulação geral de inverno do hemisfério norte e da oscilação meridional e suas possíveis conexões com o clima do NE brasileiro*. Dissertação de Mestrado, INPE, São José dos Campos - SP.
- GIRARDI, C.; TEIXEIRA, L. (1978) *Prognóstico de período de seca para o nordeste brasileiro*. São José dos Campos, CTA/IAE, 18p. (IAE Relatório Técnico ECA-06/78).

- GOMES FILHO, M.F. (1979) *Um estudo sobre a influência do albedo diferencial e da orografia na circulação atmosférica: uma Aplicação para o Nordeste Brasileiro*. Tese de Mestrado em Meteorologia. São José dos Campos, INPE, 86 p. (INPE-1640-TDL/015).
- HASTENRATH, S.; HELLER, L. (1977) Dynamics of climatic hazards of northeast Brazil. *Quarterly journal of the Royal Meteorological Society*, 103(435):77-92.
- JONES, R.H.; KEARNS, J.P. (1976) Fortaleza, Ceará, Brazil rainfall. *Journal of Applied Meteorology*, 15(3):307-308.
- KOUSKY, V.E. (1979) Frontal influences on northeast Brazil. *Monthly Weather Review*, 107(9):1140-1153.
- (1980) Diurnal rainfall variation in northeast Brazil. *Monthly Weather Review*, 108(4):488-498.
- KOUSKY, V.E.; MEIRA FILHO, L.G. (1980) *Compilação dos dados de chuva de Fortaleza*. São José dos Campos. Comunicação pessoal a C.A. Nobre, em 1980.
- MARKHAN, C.G. (1974) Apparent periodicities in rainfall at Fortaleza, Ceará, Brazil. *Journal of Applied Meteorology*, 13(1):176-179.
- MARKHAN, C.G.; McLAIN, D.R. (1977) Sea surface temperature related to rain in Ceará, northeastern Brazil. *Nature*, 265(5592):320-323.
- MORETTIN, P.A.; MESQUITA, A.R.; ROCHA, J.G.C. (1984) Rainfall at Fortaleza in Brazil Revisited to appear in *Time Series Analysis: Theory and Practice 6* (O.D. Anderson, Ed.), North Holland.
- MOURA, A.D.; SHUKLA, J. (1981) On the dynamics of drought in northeastern Brazil: Observations, theory and numerical experiment with a general circulation model. *Journal of Atmospheric Science*, 38(12).
- NAMIAS, J. (1972) Influence of northern hemisphere general circulation on drought in northeast Brazil. *Tellus*, 24(4):336-343.
- NOBRE, C.A. (1980) *Análise espectral das cotas do Rio Negro em Manaus*. Não publicado.
- (1983) *Tropical heat sources and their associated large-scale atmospheric circulation*. Ph.D. dissertation, M.I.T., Cambridge, MA.

- NOBRE, C.A.; YANASSE, H.H.; YANASSE, C.C.F. (1982) *Previsão de secas no Nordeste pelo método das periodicidades: usos e abusos*. INPE-2344-PRE/407. São José dos Campos, SP.
- NOBRE, P. (no prelo) *Fontes de calor nos trópicos e escoamentos anômalos de larga escala associados com anomalias de precipitação no Nordeste do Brasil*. Dissertação de Mestrado, INPE, São José dos Campos, SP.
- SAMPAIO FERRAZ, J. de (1929a) Sir Gilbert Walker's formula for Ceará droughts: suggestion for its physical explanation. *Meteorological Magazine*, 64(760):81-84.
- (1929b) *Sêccas no nordeste; ensaios pelo método das correlações*. Rio de Janeiro. Ministério da Agricultura, Indústria e Comércio. Directoria de Meteorologia. 12 p.
- (1950) Iminência duma "grande" seca nordestina. *Revista Brasileira de Geografia*, 12(1):3-15.
- SERRA, A. (1956) As secas no Nordeste. *Boletim Geográfico*, 14(132):269-270.
- SHIMSHONI, M. (1971) On Fisher's test of significance in harmonic analysis. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 23:373-377.
- STRANG, D.M.G. (1972) *Análises climatológicas de precipitação no nordeste do Brasil*. São José dos Campos, CTA/IAE. 29 p. + ap. c/41p. (Relatório técnico IAE-M-02/72).
- (1979) *Utilização dos dados pluviométricos de Fortaleza, CE, visando determinar probabilidade de anos secos chuvosos*. São José dos Campos, CTA/IAE. 40 p. + ap. c/20 p. (IAE Relatório Técnico ECA-03/79).
- WALKER, G.T. (1928) Ceará (Brazil) famines and the general air movement. *Beitrag zur Physik der Frein Atmosphere*, 14:88-93.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO) (1976) The power spectrum and general principles of its application to the evaluation of non-randomness in climatological series: test of statistical significance applied to power spectra. In: ——— *Climatic change*. Geneva. p. 36-42. (WMO Technical Note N° 79/WMO N° 195 TP. 100).