

SÉRIE TEMPORAL DE PRECIPITAÇÃO MENSAL DE FORTALEZA, BRASIL: COMPARAÇÃO ENTRE OBSERVAÇÕES E DADOS DE REANÁLISE DO NCEP/NCAR

ROBERTO LAGE GUEDES^{1,3}, RITA VALÉRIA ANDREOLI², MARY TOSHIE KAYANO²,
MARCOS DAISUKE OYAMA¹ E MARIA APARECIDA SENAUBAR ALVES¹

¹Centro Técnico Aeroespacial, Instituto de Aeronáutica e Espaço, Divisão de Ciências Atmosféricas
Praça Mal. do Ar Eduardo Gomes, 50, 12228-904, São José dos Campos, SP

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
Av. dos Astronautas, 1758, 12227-010, São José dos Campos, SP

³Correspondência. Tel.: (12) 3947-4589, Fax: (12) 3947-4551
E-mail: roblg@iae.cta.br

Recebido Novembro 2003 - Aceito Setembro 2004

RESUMO

Este trabalho apresenta uma comparação entre os totais mensais de precipitação observada e obtida da Reanálise do NCEP/NCAR para Fortaleza, Ceará, Brasil (3°S, 39°W). Para apoiar a discussão dos resultados utilizou-se de índices de temperatura da superfície do mar dos oceanos Pacífico e Atlântico Tropical. Foi feita, inicialmente, uma comparação da climatologia e, posteriormente, utilizou-se a análise de ondeleta para estudar as variabilidades dominantes em tempo e escala. Os totais anuais observados e da Reanálise são comparáveis. Entretanto, o ciclo anual da Reanálise parece estar um mês adiantado em relação ao dos dados observados e os desvios padrões mensais apresentam grandes diferenças. Procedimentos de “scaling” não conseguem corrigir as diferenças entre observações e Reanálise na escala mensal. O espectro de potência global da ondeleta da precipitação da Reanálise mostra uma variabilidade estatisticamente significativa entre 15 e 17 anos, inexistente nas observações. Portanto, o uso de dados de precipitação da Reanálise para estudos da variabilidade na escala de 15 a 20 anos deve ser feito com cautela.

Palavras-chave: Comparação entre observações e dados de Reanálise, Reanálise do NCEP/NCAR, precipitação, ondeleta, Fortaleza.

ABSTRACT: MONTHLY PRECIPITATION TIME SERIES OF FORTALEZA, BRAZIL: COMPARISON BETWEEN OBSERVATIONS AND NCEP/NCAR REANALYSIS

A comparison of monthly precipitation time series between observations and NCEP/NCAR Reanalysis data for Fortaleza (Ceará, Brazil, 3°S, 39°W) is carried out. The observed sea surface temperature indices for Tropical Pacific and Atlantic are also used for discussion purposes. Firstly, the observed and Reanalysis precipitation climatology (annual and monthly timescales) are compared; then, wavelet analysis is used to study the dominant variability scales and their variations in time. Observed and Reanalysis annual total precipitation are comparable. However, Reanalysis precipitation annual cycle seems to be one month ahead of the observations and the standard deviations on monthly scale show marked discrepancies. Scaling procedures are not enough to overcome these differences on monthly timescale. The global wavelet power spectrum of the Reanalysis precipitation has a significant variability between 15-17 years which is not found in the observed data. Therefore, caution should be taken in using Reanalysis precipitation data for variability over the 15-20 years scale.

Key words: Comparison between observations and Reanalysis data, NCEP/NCAR Reanalysis, precipitation, wavelet, Fortaleza.

1. INTRODUÇÃO

Fortaleza, Ceará, localiza-se na costa norte do Nordeste brasileiro (em aproximadamente 3°S, 39°W). O total anual médio de precipitação é de cerca de 1500 mm. Em média, sazonalmente, a precipitação concentra-se no trimestre de março a maio, quando ocorre mais de 50% do total anual, e a estação seca estende-se de agosto a novembro. Essas características climatológicas (total anual e ciclo sazonal) são bem conhecidas

(p.ex., Strang, 1972; Rao et al., 1996).

Por possuir uma série de totais mensais de precipitação disponível desde 1849 (uma das mais longas da região equatorial), vários estudos foram realizados para caracterizar a variabilidade de baixa frequência de Fortaleza. Além da variabilidade em 2-5 anos (interanual), periodicidades em 10-14 e 20-27 anos foram também identificadas (Markham, 1974; Kousky e Chu, 1978; Girardi e Teixeira, 1978). Embora alguns estudos com análise espectral questionem a existência

das periodicidades em 10-14 e 20-27 anos (p.ex., Jones e Kearns, 1976), vários outros têm demonstrado a sua existência (p. ex., Hastenrath e Kaczmarczyk, 1981; Datsenko et al. 1995, Kane e Trivedi, 1988; Andreoli et al., 2004). As variabilidades interanual e interdecadal da precipitação em Fortaleza estão associadas às variações na temperatura da superfície do mar (TSM) dos oceanos Pacífico e Atlântico Tropical (p.ex., Ropelewski and Halpert, 1987; Moura e Shukla, 1981; Uvo et al., 1998; Pezzi e Cavalcanti, 2001; Markham e McLain, 1977; Chu, 1984).

Atualmente, muitos trabalhos científicos vêm utilizando dados de Reanálise produzidos em conjunto pelo National Centers for Environmental Prediction (NCEP) e National Center for Atmospheric Research (NCAR) (Kalnay et al., 1996; Kistler et al., 2001). Em função dessa ampla utilização, é conveniente verificar se os dados de Reanálise do NCEP/NCAR reproduzem a climatologia (comportamento médio e ciclo anual) e as variabilidades de baixa frequência observadas para as regiões de interesse (p.ex., costa norte do Nordeste brasileiro). Essa validação se faz necessária, pois os dados de Reanálise podem conter erros sistemáticos para a América do Sul. Por exemplo, Costa e Foley (1998) e Rocha (2001) mostraram que a Reanálise do NCEP/NCAR contém erros substanciais no posicionamento dos centros de máxima precipitação na Amazônia.

Para caracterizar a variabilidade de sinais geofísicos, um método tradicional é a análise espectral. Entretanto, mais recentemente, a análise de ondeleta (p.ex., Torrence e Compo, 1998) também vem sendo utilizada. Complementando a análise espectral, a análise de ondeleta permite localizar a ação das variabilidades no tempo. No presente trabalho, caracteriza-se a variabilidade de baixa frequência dos dados observados e de Reanálise por meio da análise de ondeleta. A partir dessa caracterização, comparam-se os dois conjuntos de dados para a baixa frequência.

O objetivo deste trabalho consiste em comparar a climatologia e a variabilidade de baixa frequência entre a precipitação observada de Fortaleza e os dados de precipitação da Reanálise do NCEP/NCAR. Para caracterizar e comparar a variabilidade de baixa frequência realiza-se a análise de ondeleta. O trabalho está organizado da seguinte forma. Nas seções 2 e 3, apresentam-se os dados e a metodologia utilizados, respectivamente. Na seção 4, faz-se a comparação do ciclo anual. Na seção 5, faz-se a comparação por meio da análise de ondeleta. Na seção 6, apresentam-se o sumário e as conclusões.

2. DADOS

A série de totais mensais observados na cidade de Fortaleza, Ceará, Brasil, compreende o período de janeiro de 1849 a dezembro de 2002. Os dados de 1849 a 1970 provêm de Strang (1979), e de 1971 a 2002, do Comando da Aeronáutica (dados mensalmente enviados à Divisão de Ciências Atmosféricas, Instituto de Aeronáutica e Espaço, Centro Técnico Aeroespacial), da estação localizada em 03°47'S,

38°32'W, 25 m acima do nível do mar (número sinótico atual: 82398), e que está situada na área do Aeroporto Pinto Martins (Figura 1). Neste trabalho, são utilizados os dados de 1951 a 2000 (Tabela 1).

Os totais mensais de precipitação da Reanálise do NCEP/NCAR foram fornecidos pelo NOAA-CIRES Climate Diagnostics Center, Boulder, Colorado, USA, por meio do sítio <<http://www.cdc.noaa.gov>>. Os dados compreendem o período de janeiro de 1951 a dezembro de 2000 e possuem resolução horizontal de 2,5°.

Como as coordenadas da estação em Fortaleza não correspondem à localização de um único ponto de grade dos dados de Reanálise, as observações são comparadas à média entre os valores dos dois pontos de grade continentais mais próximos à Fortaleza, como indicado na Figura 1. A média é ponderada pela distância do ponto de grade à Fortaleza.

Guedes e Machado (2003), utilizando dados de Reanálise do NCEP/NCAR, mostraram que, na presença de grandes aglomerados convectivos, o transporte vertical de massa é maior sobre o continente que sobre o oceano. Além disso, mostraram que, na média e alta troposfera, há maior ascendência sobre o continente que sobre o oceano, ocorrendo o contrário na baixa troposfera. Assim, para evitar suavização da magnitude das perturbações convectivas (que estão relacionadas à precipitação) foram utilizados somente os dois pontos de grade continentais próximos a Fortaleza.

Como a precipitação da Reanálise se refere à média dos dados em dois pontos de grade distanciados entre si de 2,5°, as diferenças entre observações e Reanálise poderiam decorrer das diferentes representatividades dos dados utilizados. Ou seja, os registros de precipitação observada poderiam ter uma componente local consideravelmente

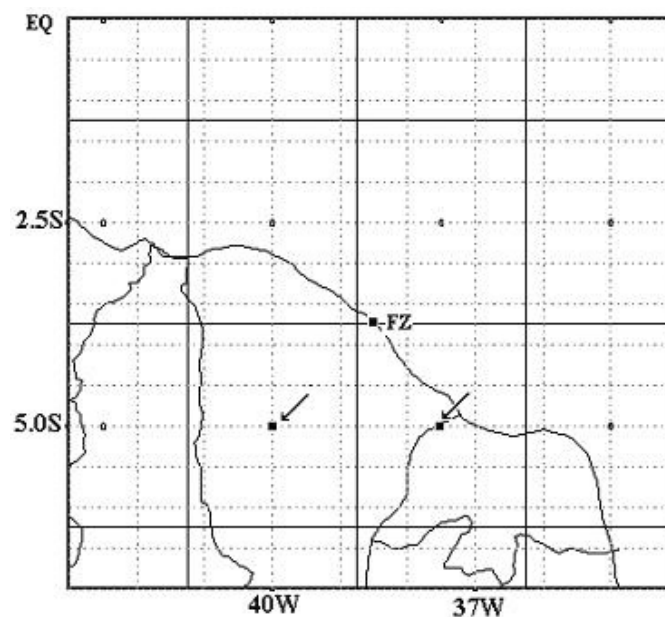


Figura 1: Localização da estação meteorológica de Fortaleza (FZ) (03.47°S, 38.32°W - número sinótico atual: 82398) bem como dos pontos de grade do NCEP/NCAR utilizados no trabalho e indicados por seta.

grande, enquanto os da Reanálise, um sinal característico de escalas maiores, o que dificultaria a comparação. No entanto, o fato de que a variabilidade interanual possui um sinal bastante homogêneo na região norte do Nordeste brasileiro (Kousky e Chu, 1978) sugere que as influências locais devem atuar em escalas temporais de frequência mais alta.

Ressalta-se que o ideal é que o ponto de grade coincidissem com a estação a qual se deseja fazer a comparação, o que é consideravelmente difícil. Entretanto, existe uma boa correlação entre os totais anuais de precipitação entre a estação de Fortaleza e estações que estão mais no interior do Ceará (por exemplo, Quixeramobim e Mossoró), apesar dos valores totais se reduzirem consideravelmente quanto mais interior for a localidade (Kousky and Chu, 1978; Teixeira et. al, 1980). Assim, o sinal de baixa frequência deve ter característica

semelhante tanto local (Fortaleza) quanto regionalmente (costa norte do Nordeste brasileiro). Portanto, a comparação realizada neste trabalho pode ser considerada válida, apesar de ser baseada nos dados de somente uma estação.

Os dados de temperatura da superfície do mar (TSM), utilizados para apoiar a discussão dos resultados, correspondem às séries históricas reconstruídas por Smith et al. (1996). Estes dados foram obtidos do sítio <<http://podaac.jpl.nasa.gov>>, e compreendem o período de janeiro de 1950 a dezembro de 1998. A partir desses dados, foram calculados índices para o Pacífico (Nino3.4) e Atlântico (dipolo) segundo Trenberth (1997) e Servain (1991), respectivamente.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
1951	14.3	14.8	32.0	306.2	92.7	202.3	11.5	0.0	3.8	16.2	68.9	15.0	777.7
1952	83.1	90.8	566.0	390.5	134.1	27.1	23.4	9.6	7.5	6.0	0.9	7.2	1346.2
1953	47.3	73.2	201.8	404.3	92.5	80.2	2.0	0.0	16.4	5.6	0.7	6.8	930.8
1954	19.7	158.7	185.1	190.1	184.4	118.7	10.6	6.7	2.0	0.5	3.1	9.5	889.1
1955	76.1	81.1	152.9	366.4	175.8	38.8	14.2	4.4	19.5	28.6	11.2	99.9	1068.9
1956	63.4	106.3	131.4	202.6	98.9	36.1	30.0	64.0	9.4	1.9	0.7	8.0	752.7
1957	113.7	19.7	429.4	422.2	69.4	26.9	8.3	14.6	19.7	8.0	0.4	28.4	1160.7
1958	14.0	45.1	65.0	119.0	161.5	96.4	62.3	4.9	10.8	0.2	3.1	9.9	592.2
1959	127.2	198.7	456.8	209.0	316.8	88.9	3.7	24.0	12.0	5.1	6.9	289.3	1738.4
1960	16.4	10.1	428.7	218.4	256.9	70.4	3.6	6.4	4.0	27.6	2.3	33.5	1078.3
1961	162.1	46.5	465.3	164.8	348.0	186.3	76.4	0.3	16.9	5.0	7.9	67.6	1547.1
1962	71.6	100.4	84.4	381.1	172.5	93.3	5.5	29.0	31.4	7.2	11.8	11.7	999.9
1963	220.7	247.4	221.1	585.2	113.6	41.8	4.0	0.2	6.0	2.3	34.4	208.4	1685.1
1964	294.3	503.7	388.3	538.6	310.7	95.0	145.9	26.3	78.0	9.1	3.8	17.2	2410.9
1965	112.9	10.2	212.1	469.3	386.9	313.9	60.7	37.3	13.7	5.9	2.1	10.2	1635.2
1966	27.2	48.2	180.9	339.3	300.5	154.3	156.4	15.7	44.6	2.0	19.4	2.8	1291.3
1967	21.8	402.7	362.6	358.7	338.4	182.1	88.4	32.4	22.6	17.8	2.6	9.2	1839.3
1968	26.0	106.8	211.4	341.7	291.3	20.4	59.9	11.0	6.7	25.2	173.1	46.7	1320.2
1969	81.2	100.6	489.7	349.6	374.7	151.5	183.9	26.8	19.4	19.9	1.5	4.0	1802.8
1970	38.7	39.0	220.8	578.6	53.5	89.2	33.2	15.3	4.1	6.0	47.1	12.5	1138.0
1971	145.3	177.7	329.2	215.4	450.0	259.3	298.8	29.2	8.3	29.7	11.0	38.5	1992.4
1972	311.5	98.1	174.6	185.9	305.0	250.1	111.9	190.4	16.6	7.8	3.6	41.7	1697.2
1973	126.5	434.3	424.2	409.9	332.1	235.3	198.1	25.8	38.7	12.9	26.8	3.0	2267.6
1974	308.0	189.0	274.0	574.0	670.0	210.0	37.0	30.0	74.0	23.0	30.0	93.0	2512.0
1975	115.0	132.0	465.0	253.0	384.0	162.0	120.0	12.0	26.0	14.0	13.0	82.0	1778.0
1976	54.0	364.0	334.0	384.0	112.0	71.0	32.0	14.0	5.0	12.0	21.0	14.0	1417.0
1977	217.0	135.0	241.0	339.0	195.0	427.0	219.0	36.0	7.0	22.0	40.0	63.0	1941.0
1978	78.0	351.0	199.0	241.0	322.0	79.0	235.0	10.0	34.0	37.1	18.9	61.1	1666.1
1979	38.2	171.4	293.5	106.6	249.3	41.3	16.3	43.0	60.6	8.4	9.8	16.8	1055.2
1980	164.0	333.7	165.3	33.4	64.1	117.0	26.2	15.7	25.7	8.7	5.4	12.4	971.6
1981	62.9	70.9	528.0	108.2	90.7	31.9	0.0	10.6	0.0	0.7	7.3	69.0	980.2
1982	110.6	125.7	184.7	260.8	134.1	92.8	50.1	22.9	26.0	17.1	7.3	11.9	1044.0
1983	30.2	200.0	280.0	151.2	61.8	135.0	45.2	18.1	6.5	11.7	1.0	31.0	971.7
1984	118.7	222.6	342.0	355.6	303.5	276.4	152.0	35.3	25.5	45.2	5.1	6.4	1888.3
1985	188.0	541.0	514.0	529.0	355.0	218.0	192.0	29.0	51.0	0.0	6.9	206.0	2829.9
1986	155.0	388.0	461.0	554.0	159.0	359.0	26.0	57.0	12.0	11.0	30.0	62.0	2274.0
1987	53.0	142.0	411.0	225.0	55.0	238.0	74.0	26.0	16.0	4.0	0.0	2.0	1246.0
1988	189.0	218.0	387.0	302.0	254.0	131.0	77.0	1.0	0.0	17.0	25.0	156.0	1757.0
1989	177.0	36.0	221.0	290.0	159.3	177.0	112.6	57.0	52.0	90.0	10.0	67.0	1448.9
1990	26.6	124.8	112.7	179.8	159.9	29.4	85.6	6.4	25.3	14.2	4.7	13.6	783.0
1991	44.6	160.6	570.3	297.8	176.4	69.1	9.6	17.0	1.6	53.9	8.3	0.0	1409.2
1992	84.6	219.2	305.8	226.4	104.6	125.6	11.5	20.0	8.7	7.7	2.3	1.6	1118.0
1993	38.5	94.8	234.9	191.5	76.7	53.8	162.2	25.5	14.6	1.8	6.7	32.3	933.3
1994	150.8	215.9	609.5	514.9	342.9	622.7	102.7	27.3	26.8	4.8	7.8	53.0	2679.1
1995	144.8	211.5	492.8	707.1	253.1	196.4	78.0	4.1	0.1	22.0	6.5	3.8	2120.2
1996	93.8	154.1	377.4	437.8	232.1	59.5	26.3	36.7	11.0	10.6	4.5	12.1	1455.9
1997	14.6	52.1	121.0	473.4	198.8	7.7	15.1	9.0	0.7	0.2	18.4	29.5	940.5
1998	196.4	51.7	289.4	135.6	77.3	20.7	54.5	40.7	3.7	15.0	6.9	12.3	904.2
1999	45.5	151.2	310.1	363.9	244.8	28.0	0.2	7.3	17.5	12.9	14.9	38.9	1235.2
2000	239.5	135.6	291.3	451.5	165.4	63.3	119.8	115.0	150.1	1.6	12.0	7.8	1752.9

Tabela 1: Total mensal de precipitação de Fortaleza utilizado neste trabalho.

3. METODOLOGIA

Foram calculadas as médias e os desvios padrões mensais da precipitação (observada e da Reanálise) para o período de 1951 a 2000. As séries submetidas à análise de ondeleta foram pré-processadas da seguinte forma. Para cada série, inicialmente, o ciclo anual foi retirado. A seguir, foi calculado o desvio padrão total e este valor foi utilizado para adimensionalizar os dados. Finalmente, retirou-se a tendência de longo prazo. Este procedimento também foi utilizado para pré-processar os índices oceânicos (Nino3.4 e dipolo).

A transformada de Fourier (TF) é comumente utilizada para estudar as periodicidades de séries geofísicas. Na TF, a série é considerada estacionária e as periodicidades presentes em toda a série são obtidas. Entretanto, com o uso da transformada de ondeleta (TO) (em inglês, “wavelet transform”), a decomposição é realizada não somente na frequência (como a TF), mas também no tempo, ou seja, a TO produz um espectro de potência decomposto em tempo e escala (frequência). Logo, a TO permite, por um lado, caracterizar a intermitência dos sinais geofísicos; por outro lado, mostrar a interação entre diversas escalas temporais. A média temporal do espectro de potência em tempo-escala é o espectro de potência global.

A ondeleta de Morlet é escolhida como ondeleta-mãe. A ondeleta de Morlet é dada por $\psi_0(\eta) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0\eta} e^{-\eta^2/2}$ (Eq. 1 de Torrence e Compo, 1998, p.63), sendo que ω_0 é a frequência na forma adimensional, considerada igual a 6 para satisfazer a condição de admissibilidade, e η refere-se ao tempo na forma adimensional. A ondeleta de Morlet pode ser entendida como uma função periódica (no tempo) cuja amplitude é modulada por uma gaussiana (no tempo) (Fig. 2a de Torrence e Compo, 1998, p.63). Segundo Torrence and Compo (1998), a ondeleta de Morlet se adapta melhor a oscilações mais suaves como as encontradas nos dados geofísicos utilizados neste trabalho. O uso da ondeleta de Morlet está discutido em diversos trabalhos (p.ex., Foufoula-Georgiou and Kumar, 1994; Lau and Weng, 1995; Torrence and Compo, 1998; Chapa et al., 1998). Os programas de análise de ondeleta foram fornecidos por C. Torrence e G. P. Compo através do sítio <<http://paos.colorado.edu/research/wavelets/>>.

Para permitir que seja possível reproduzir os resultados obtidos neste trabalho, devem-se utilizar os seguintes “settings” nos programas de análise de ondeleta. O número de dados utilizados é de 600 registros (12 meses x 50 anos). O intervalo de tempo entre cada dado é tomado como sendo 1, pois se tem um dado para cada mês. A menor escala onde se aplica a ondeleta é o dobro do intervalo de tempo. O espaço típico entre as escalas é definido como 0,125. O nível de significância usado é de 0,05 (95% de significância) e o número total de escalas para este conjunto de dados é de 62 escalas. O coeficiente associado à auto-correlação da série é tomado como $\alpha = (C_{x,y_{(comlag1)}} + (C_{x,y_{(comlag2)}})^{0.5})/2$, onde $C_{x,y_{(comlag1)}}$ é a auto-correlação da série com lag 1; e $C_{x,y_{(comlag2)}}$ com lag 2. A escolha destes “settings” segue o recomendado em Torrence and Compo (1998).

4. COMPARAÇÃO DO CICLO ANUAL

Há boa concordância entre médias e desvios padrões dos totais anuais de precipitação observada e da Reanálise para o período de 1951 a 2000. A média do total anual é de 1462 mm para as observações e 1595 mm para a Reanálise; o desvio padrão, de 540 mm para as observações e 597 mm para a Reanálise. Os desvios dos totais anuais (em relação à média) normalizados pelo correspondente desvio-padrão mostram uma relativa concordância entre observações e Reanálise (Figura 2). O coeficiente de correlação linear entre as séries dos desvios normalizados é de 0,60 e é significativo a 95%. Entretanto, as correlações entre meses individuais mostram, para fevereiro e março, o valor de 0,50; para abril, 0,32; para maio, 0,59; e para a quadra chuvosa como um todo, 0,58.

Com relação à média, o ciclo anual observado é semelhante ao da Reanálise (Figura 3), com o maior valor ocorrendo em abril para a precipitação observada, e em março para a precipitação da Reanálise. Ou seja, a Reanálise antecipa em um mês o máximo de precipitação esperado para Fortaleza. Além disto, ao longo de todo o ano, há uma antecipação das condições de precipitação pelos dados de Reanálise em relação às observações. Em mais de 60% dos casos, a precipitação máxima e/ou mínima nos dados de Reanálise encontra-se adiantada em 1 mês ou mais em relação às observações. Isso mostra que a defasagem dos valores médios não decorre da presença de um ou outro valor extremo de precipitação da Reanálise.

De forma semelhante à média, o mês de maior desvio padrão da precipitação observada é abril, enquanto da Reanálise pode ser considerado um conjunto de meses de fevereiro a abril (Figura 3). É interessante notar também que os desvios padrões da precipitação observada são consideravelmente maiores que aqueles obtidos pela Reanálise, principalmente para os meses mais chuvosos. Por exemplo, em abril, o desvio padrão obtido pela Reanálise representa pouco mais da metade do desvio observado.

É importante mencionar também que a série extraída da Reanálise mostra uma variabilidade menor do que aquela

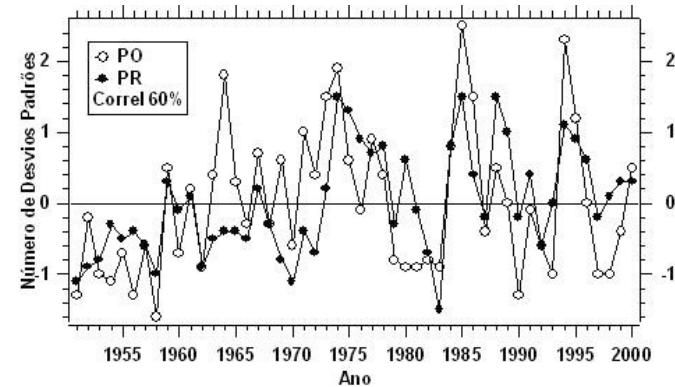


Figura 2: Totais anuais de precipitação de Fortaleza, no período de 1951 a 2000, sendo a representação “PO” tomado como a precipitação observada e “PR” a da Reanálise. O valor 60% corresponde a correlação linear entre as duas séries.

apresentada pela série dos totais mensais observados de Fortaleza. E essa discrepância é mais importante exatamente no período de maior interesse para a região, ou seja, na pré-estação chuvosa (janeiro), na quadra chuvosa (fevereiro-maio) e na pós-estação (junho e julho). Ou seja, a Reanálise parece representar somente parcialmente os processos que produzem as variabilidades de frequência mais baixa na precipitação.

Para lidar com erros sistemáticos, uma das formas de correção é adotar relações de “scaling”. Embora os valores absolutos possam ser discrepantes, as anomalias normalizadas podem ter um comportamento semelhante (p.ex., Marengo et al., 2001). Na escala anual, as anomalias normalizadas de precipitação observada e da Reanálise mostram muitas semelhanças, conforme mostrados e discutidos anteriormente (Figura 2). Na escala mensal, o uso de “scaling” corrigiria as diferenças entre observações e Reanálise? Para responder essa questão, supondo que a anomalia mensal de precipitação normalizada pelo desvio padrão mensal seja a mesma para

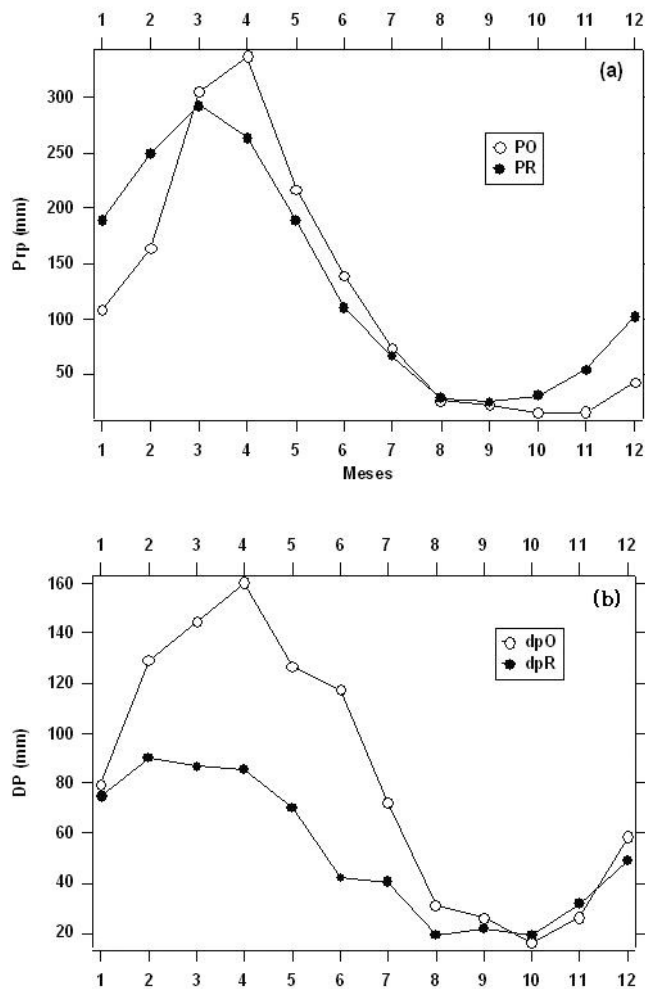


Figura 3: Precipitações médias (mm) (a) e desvio padrão (b) de Fortaleza para o período de 1950 a 2000, onde PO é a precipitação média observada e PR é a precipitação média derivada da Reanálise dos dados do NCEP/NCAR; dpO é o desvio padrão da precipitação observada e dpR é da Reanálise.

observações e Reanálise, é possível reconstruir uma série de precipitação na forma:

$$\frac{y_{i,j} - \bar{y}}{\sigma_{y,i}} = \frac{x_{i,j} - \bar{x}}{\sigma_{x,i}}, \quad (\dots)_i = \sum_{j=1}^N (\dots)_{i,j} \quad \text{e} \quad \sigma_{(\dots)_i}^2 = \frac{\sum_{j=1}^N [(\dots)_{i,j} - \overline{(\dots)_i}]^2}{N-1} \quad (1)$$

onde os subscritos i e j referem-se ao mês e ano, respectivamente; N é o total de anos; y , a precipitação reconstruída; \bar{y} , a precipitação média da Reanálise; σ_y , o desvio padrão da Reanálise; x , a precipitação observada; \bar{x} , a precipitação média observada; e σ_x , o desvio padrão observado. Se a precipitação reconstruída capturasse bem a variabilidade da precipitação observada, então a diferença entre elas (reconstruída menos observada) seria pequena.

Na Figura 4, mostra-se que a dispersão dos valores de precipitação observada e reconstruída para o mês de abril no período de 1951 a 2001 é bastante grande. O mesmo ocorre para os demais meses (não mostrado). Logo, o “scaling” dado pela Equação 1 não é suficiente para corrigir as diferenças entre observações e precipitação da Reanálise na escala mensal.

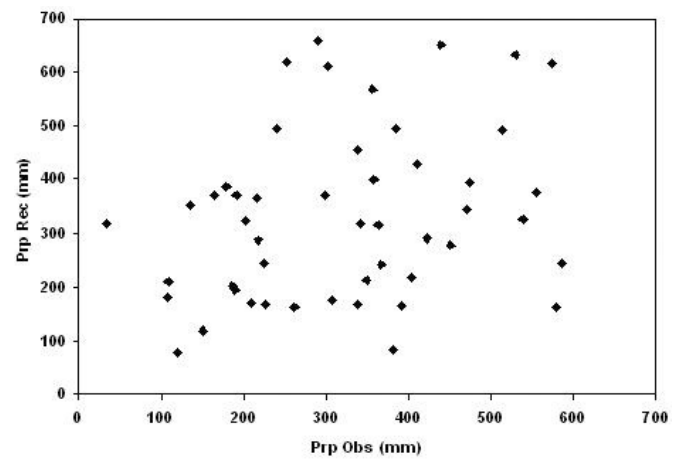


Figura 4: Dispersão entre a precipitação observada em Fortaleza e a reconstruída pelo processo de “scaling” para o mês de abril no período de 1951 a 2000.

5. ANÁLISE DE ONDELETA

5.1. Contribuição do ciclo anual no sinal total

Antes de remover o ciclo anual e adimensionalizar as séries temporais, avaliou-se, por meio do espectro de potência global (EPG), a contribuição do ciclo anual nas variâncias totais das séries temporais de precipitação. Para a precipitação observada, o ciclo anual contribuiu com 11% da variância; para a precipitação da Reanálise, 14% significativas a 95% no EPG tanto nas observações quanto na Reanálise. Portanto, os dados da Reanálise têm a tendência de superestimar a contribuição do ciclo anual na variância total, embora não tenha sido feito um teste que permita afirmar que há diferença estatisticamente significativa entre as porcentagens anteriormente citadas. No restante desta

seção, conforme exposto na seção 3, as séries temporais têm o seu ciclo anual removido, são adimensionalizadas pelo desvio padrão e suas tendências são retiradas.

5.2. Comparação utilizando o espectro de potência global

Na Figura 5 (painel à direita), mostram-se o EPG para a precipitação observada e da Reanálise. Nota-se que a variabilidade em 10-14 anos para a precipitação observada é significativa a 95%. Para a precipitação da Reanálise, as variações interdecadais estendem-se de 10 anos até cerca de 17 anos e são significativas a 95%. A variabilidade interanual não é significativa tanto para as observações quanto para a Reanálise.

Analisando-se em conjunto os EPG (Figura 6), percebe-se que, para a variabilidade interdecadal entre 10-14 anos, há uma relativa concordância entre observações e Reanálise. No entanto, enquanto nas observações a variabilidade não se estende além de 15 anos, na Reanálise a variabilidade se inicia ao redor de 10 anos e se estende até ao redor de 17 anos. Na precipitação observada, em torno de 16-17 anos, pode-se notar um indício de “gap” espectral. A Reanálise, portanto, não representa bem a variabilidade da precipitação na

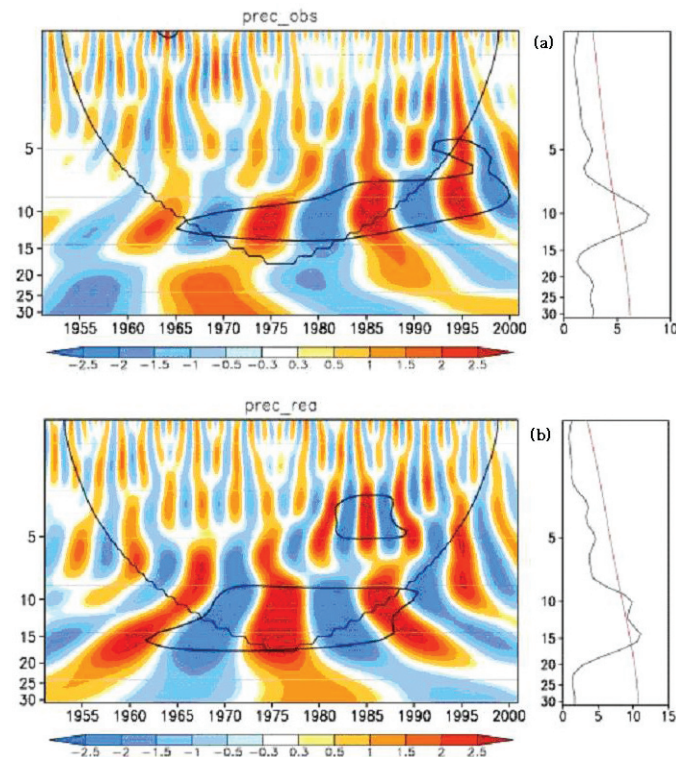


Figura 5: Parte real da transformada da ondeleta em números de desvios padrões (NDP) da série total, e o espectro de potência global (NDP^2), onde (a) representa os dados observados e (b) precipitação da Reanálise. As curvas contínuas nos painéis à esquerda referem-se à significância local ao nível de confiança de 95%. A curva em forma de cone representa o cone de influência da TO, abaixo da qual os efeitos de borda são importantes. A curva vermelha contínua nos painéis à direita delimitam a significância ao nível de confiança de 95 %.

escala de 15-20 anos.

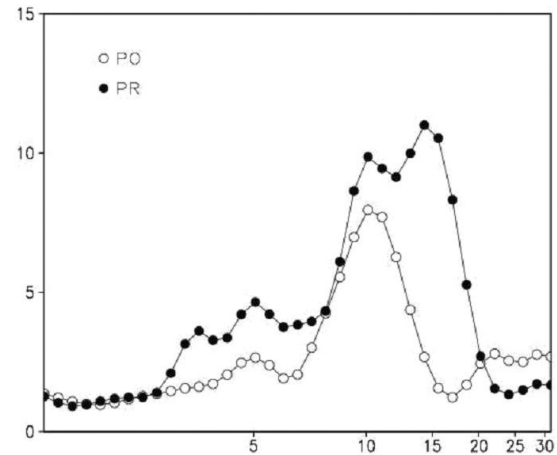


Figura 6: Espectro de potência global (NDP^2) para o total mensal de precipitação em Fortaleza para a precipitação observada (PO - círculo vazio) e a obtida pela Reanálise (PR - círculo cheio) no período de 1951 a 2000.

As Figuras 7 e 8 (painel à direita) mostram o EPG para os índices oceânicos (Nino3.4 e dipolo). Para o Nino3.4, as variações interanuais são significativas a 95% e as variações interdecadais não apresentam significância estatística. Para o dipolo, as variabilidades interanual (3 anos) e interdecadal (9-14 anos) são significativas a 95%. Portanto, em relação ao Pacífico equatorial, a variabilidade se concentra nas escalas interanuais entre 2-6 anos, que englobam a Oscilação Quase-Bienal (QBO) e El-Niño/Oscilação Sul (ENSO). Quanto ao dipolo, a variabilidade se concentra principalmente nas escalas interdecadais, e uma menor contribuição das escalas interanuais. Estes resultados concordam com estudos anteriores sobre as variabilidades no Pacífico e Atlântico Tropical (p.ex., Sperber e Hameed, 1993).

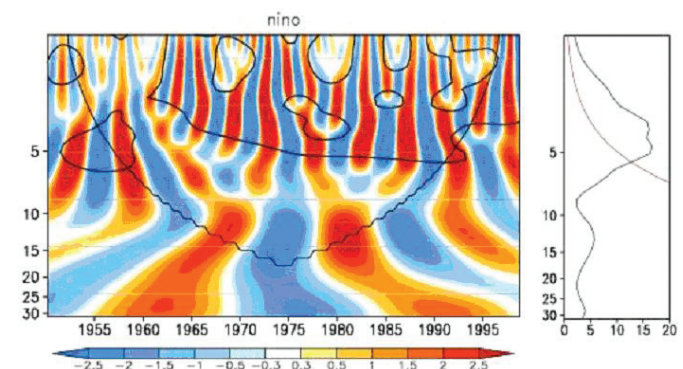


Figura 7: Parte real da transformada da ondeleta em números de desvios padrões (NDP) da série total, e o espectro de potência global (NDP^2), para o índice de TSM para as regiões de Niño 3.4 de 1950 a 1998. As curvas contínuas no painel à esquerda referem-se à significância local ao nível de confiança de 95%. A curva em forma de cone representa o cone de influência da TO, abaixo da qual os efeitos de borda são importantes. A curva vermelha contínua no painel à direita delimita a significância ao nível de confiança de 95 %.

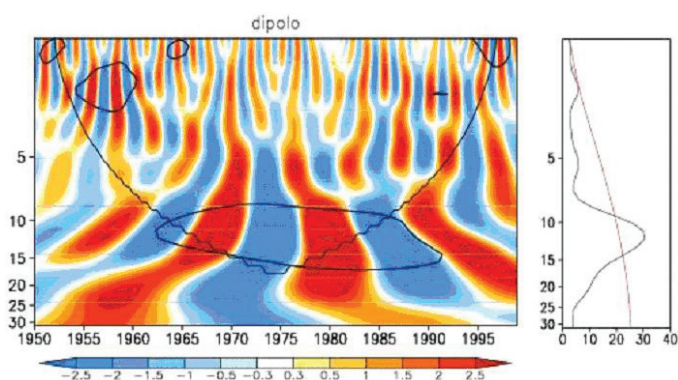


Figura 8: Parte real da transformada da ondeleta em números de desvios padrões (NDP) da série total, e o espectro de potência global (NDP^2), para o dipolo de 1950 a 1998. As curvas contínuas nos painéis à esquerda referem-se à significância local ao nível de confiança de 95%. A curva em forma de cone representa o cone de influência da TO, abaixo da qual os efeitos de borda são importantes. A curva vermelha contínua no painel à direita delimita a significância ao nível de confiança de 95 %.

5.3. Comparação em tempo-escala

Na Figura 5 (painel à esquerda), mostra-se a parte real da TO em número de desvios padrões da série total. Na precipitação observada, percebe-se que as flutuações interdecadais (em torno de 10 anos) são significativas de meados da década de 60 ao fim da década de 90, semelhante ao encontrado por Datsenko et al. (1995). Quanto às flutuações interanuais (em torno de 5-7 anos), há significância em um período de alguns anos entre 1992 e 1997. Isto pode estar associado aos efeitos de El Niños longos e intensos ocorridos neste período. Segundo Trenberth (1997), entre março de 1991 e março de 1995, a região do Niño 3.4 ficou praticamente todo o tempo com a TSM acima da média. A presença de El Niños intensos por um longo período pode ter provocado a amplificação das variâncias associadas às flutuações interanuais da década de noventa.

Na Figura 5, percebe-se que em alguns períodos (p.ex., 1975), as flutuações interdecadais apresentam-se antes das interanuais, talvez modulando as interanuais nos anos subsequentes (p.ex., flutuação interdecadal em 1975 modulando a interanual de 1979). Em outros períodos (p.ex., 1984 e 1994), há uma associação direta entre as escalas interanuais e interdecadais, i.e., há uma associação sem “gap” entre estas escalas.

Comparando observações e Reanálise, percebe-se que a Reanálise concentra excessiva variância em escalas interdecadais de 14 a 17 anos inexistentes na observação de precipitação de Fortaleza. Nessas escalas, para a precipitação da Reanálise, há significância de 1963 a 1988. Na escala em

torno de 10 anos, de forma semelhante às observações, há significância do fim da década de 60 ao início da década de 90. Na escala interanual, há significância na década de 80, diferente do que ocorre com a TO das observações. Em geral, as localizações em tempo das flutuações em torno de 10 anos apresentam-se semelhantes nas observações e na Reanálise. Entretanto, para as demais escalas, as localizações em tempo ocorrem de forma consideravelmente diferente entre Reanálise e observações.

Tomando-se a TO do Niño3.4 (Figura 7, painel à esquerda), verifica-se que as variabilidades associadas aos fenômenos QBO e ENSO estão presentes ao longo de praticamente todo o período. A variabilidade interanual é a dominante com pouca intermitência. Verificou-se também que alguns extremos de desvios de TSM (não mostrado) estão associados a interações praticamente sem “gap” entre as escalas interanuais e interdecadais (p.ex., em 1958, 1975, 1988 e 1995). No entanto, Gu e Philander (1995) mostram que, no período de 1885 a 1988, foi verificado que não é regra que a variabilidade interdecadal module a interanual. Os autores mostraram também que a amplitude do ENSO foi mais intensa no fim do século dezanove e a partir de 1960, e menos intensa entre 1915 e 1950.

No Atlântico (Figura 8, painel à esquerda), a TO mostra que o dipolo possui pouca significância local para as escalas interanuais. Isso explica a pequena contribuição da variabilidade interanual no EPG do índice do Atlântico. A variabilidade interdecadal (10-16 anos) apresenta significância entre os anos de 1973 e 1990. Quanto à interação entre escalas, de forma semelhante à precipitação observada, em alguns anos há aparente modulação das escalas interanuais pelas interdecadais – p.ex., 1967 (ao redor de 10 anos) modulando 1970 (ao redor de 5 anos). Há também modulações sem “gap”, p.ex., em 1995, quando são encontradas escalas ao redor de 10 anos associadas a escalas inferiores a 5 anos.

Observa-se que todas as séries analisadas têm interação entre as escalas interanuais e interdecadais. Isto sugere que as interações entre escalas nos oceanos podem de alguma forma estar associadas com a precipitação observada e a própria interação entre escalas em Fortaleza. Outros estudos são necessários para verificar essa possibilidade.

Comparando-se a precipitação observada e da Reanálise com o que ocorre com a TSM dos oceanos em termos de localização temporal das energias associadas a cada escala (Figura 9), percebe-se que tanto a precipitação observada quanto a da Reanálise possuem máximas energias coincidentes aos máximos de energia para TSM, o que ratifica a relação entre a precipitação em Fortaleza e a variação de TSM do Pacífico e Atlântico Tropical. Por exemplo, de 1970 a 1985, entre 10-14 anos, a precipitação observada parece estar associada ao dipolo.

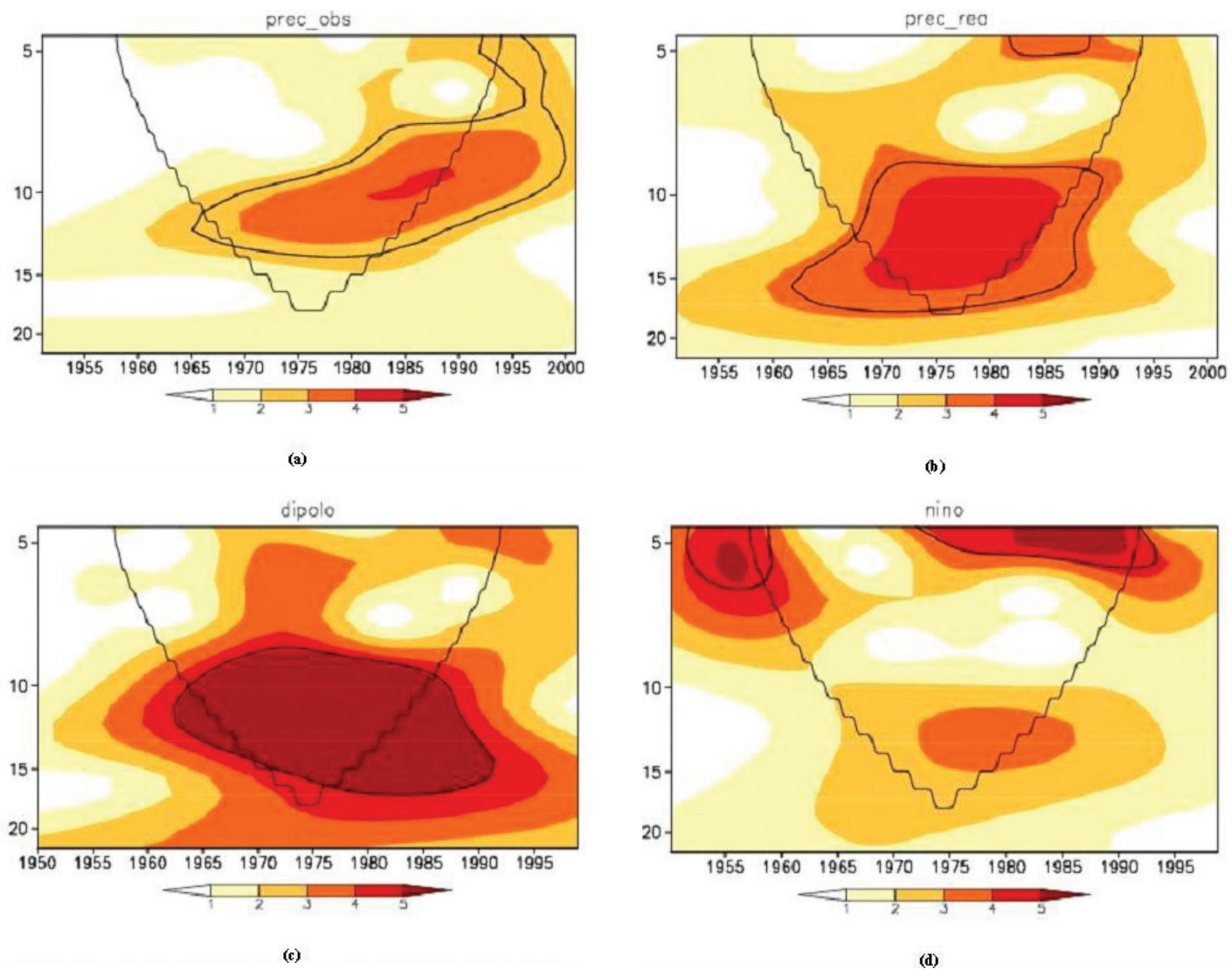


Figura 9: Amplitude da transformada da ondeleta em números de desvios padrões (NDP) da série total da (a) precipitação observada, (b) precipitação da Reanálise, (c) dipolo e (d) índice de TSM das regiões de Niño 3.4. As curvas contínuas referem-se à significância local ao nível de confiança de 95%. A curva em forma de cone representa o cone de influência da TO, abaixo da qual os efeitos de borda são importantes.

6. SUMÁRIO E CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma comparação entre a precipitação em Fortaleza observada e da Reanálise. Para apoiar a discussão dos resultados, utilizaram-se também índices de temperatura da superfície do mar (TSM) para os oceanos Tropicais Pacífico e Atlântico. A comparação foi feita, inicialmente, para a climatologia. Em seguida, utilizou-se a análise de ondeleta para estudar o comportamento das variabilidades de baixa frequência em tempo e escala.

Os totais anuais de precipitação observada e da Reanálise mostram uma boa concordância. Com respeito à média mensal existe uma relativa concordância, apesar do ciclo anual da Reanálise estar um mês adiantado em relação ao das observações. Os desvios-padrões mensais apresentam grandes diferenças. Por exemplo, em abril, mês climatológico

da máxima ocorrência de precipitação, o desvio padrão obtido pela Reanálise representa pouco mais da metade do desvio observado. Entretanto, é importante ressaltar que estas diferenças são mais importantes exatamente no período de maior interesse para a região, na pré-estação chuvosa (janeiro), na quadra chuvosa (fevereiro-maio) e na pós-estação (junho e julho). Procedimentos de “scaling” foram adotados no sentido de se corrigir prováveis erros sistemáticos presentes na série obtida pela Reanálise, porém não foram suficientes para corrigir as diferenças encontradas.

Com respeito à análise do espectro de potência global (EPG) verificou-se que a Reanálise apresenta-se mais sensível ao ciclo anual do que realmente acontece com as observações de precipitação. O EPG da Reanálise apresentou uma flutuação interdecadal entre 15 e 17 inexistente no EPG das observações de precipitação de Fortaleza. O EPG das observações nesta

escala interdecadal apresenta um “gap” de frequência.

Pode-se sugerir que as relações entre os oceanos tropicais e a precipitação observada bem como a obtida pela Reanálise na escala interdecadal 10-14 durante o período de estudo parecem estar associada à presença do dipolo o qual interfere sensivelmente na posição da ZCIT, que por sua vez influencia na precipitação do nordeste brasileiro.

Contudo, vale salientar que mudanças na circulação de Walker ou intensificação da Oscilação do Atlântico Norte podem também ter um papel importante na variabilidade da precipitação do Nordeste brasileiro (Namias, 1972; Kousky et al., 1984). As variações nessas circulações são conhecidas por serem conectadas as anomalias de TSM no Pacífico associadas ao ENOS.

Por fim, ressalta-se que o uso de dados de Reanálise deve ser feito com cautela, principalmente para estudos que consideram variabilidades de baixa frequência entre 15 e 20 anos. O presente estudo mostra que podem existir grandes diferenças de variabilidade nessas escalas entre a precipitação observada e a da Reanálise.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer aos dois revisores anônimos pela extensa análise que foi feita e pela positiva contribuição ao artigo, tornando-o mais claro e propiciando também a abertura de janelas para futuros trabalhos.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDREOLI, R. V.; KAYANO, M. T.; GUEDES, R. L.; OYAMA, M. D.; ALVES, M. A. S. A Influência da Temperatura da Superfície do Mar dos Oceanos Pacífico e Atlântico na Variabilidade de Precipitação em Fortaleza. **Rev. Bras. Meteor.**, v.19, n.3, p.337-344, 2004.
- CHAPA, S. R.; RAO, V. B.; PRASAD, G. S. S. D. Application of wavelet Transform to Meteosat Derived Cold Cloud Index Data Over South America. **Mon. Wea. Rev.**, v.126, p.2466-2481, 1998.
- COSTA, M. H.; FOLEY, J. A. A Comparison of Precipitation Datasets for the Amazon Basin. **Geophys. Res. Lett.**, v.25, n.2, p.155-158, 1998.
- CHU, P. S. Time and Space Variability of Rainfall and Surface Circulation in the Northeast Brazil - Tropical Atlantic Sector. **J. Meteor. Soc. Japan**, v.26, n.2, p.363-369, 1984.
- DATSENKO, N.M; ALVES, J. M. B.; REPELLI, C. A. Variações Pluviométricas no Nordeste Brasileiro: Comparações com Mudanças Climáticas Globais. **Rev. Bras. Meteor.**, v.10, n.2, p. 42-47, 1995.
- GIRARDI, C.; TEIXEIRA, L. Prognóstico de Período de Seca para o Nordeste Brasileiro. São José dos Campos, CTA, **Relatório Técnico ECA – 06/78**, 1978.
- FOUFOULA-GEORGIOU, E.; KUMAR, P. Wavelets in Geophysics: **Wavelet Analysis and Its Applications**. San Diego, Academic Press, 1994. 372p.
- GU, D.; PHILANDER, G. H. Secular Changes of Annual and Interannual Variability in the Tropics during de Past Century. **J. Climate**, v.8, p.864-876, 1995.
- GUEDES, R. L.; MACHADO, L. A. T. Climatologia da Estrutura Vertical das Perturbações Convectivas Sobre a América do Sul e Adjacências. **Rev. Bras. Meteor.**, v.18, n.2, p.215-230, 2003.
- HASTENRATH, S.; KACZMARCZYK, E. B. On Spectra and Coherence of Tropical Climate Anomalies, **Tellus**, v.33, n.5, p.453-462, 1981.
- JONES, R.; KERNS, J. P. Fortaleza, Ceará, Brazil Rainfall. **J. Appl. Meteor.**, v15, p.307-308, 1976.
- KANE, R. P.; TRIVEDI, N. B. Spectral Characteristics of the Annual Rainfall Series for Northeast Brazil, **Clim. Change**, v.13, p.317-336, 1988.
- KALNAY, E.; e COAUTORES. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, v.77, n.3, p.437-472, 1996.
- KISTLER, R.; e COAUTORES. The NCEP-NCAR 50-Year Reanalysis: Monthly Means: CD-ROM and Documentation. **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, n.82, p.247-267, 2001.
- KOUSKY, V. E.; CHU, P. S. Fluctuations in Annual Rainfall for Northeast Brazil. **J. Meteor. Soc. Japan**, n.57, p.457-465, 1978.
- KOUSKY, V. E.; KAYANO, M.T.; CAVALCANTI, I. F. A. A Review of the Southern Oscillation: Oceanic – Atmospheric Circulation Changes and Related Rainfall Anomalies. **Tellus**, v.36A, p.490-504, 1984.
- LAU, K.-M.; WENG, H.: Climate Signal Detection Using Wavelet Transform: How to make a Time Series Sing. **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, v.76, n.12, p.2391-2402, 1995.

- MARENGO, J.A.; CAVALCANTI, I. F. A.; SATYAMURTY, P.; NOBRE, C. A.; BONATTI, J. P.; TROSNIKOV, I.; MANZI, A. O.; SAMPAIO, G.; CAMARGO JÚNIOR, H.; SANCHES, M. B.; CASTRO, C. A. C.; D'ALMEYDA, C.; PEZZI, L. P.; CALBETE, N. O. Ensemble Simulation of Interannual Climate Variability Using the CPTEC/COLA Atmospheric Model. **Relatório de Pesquisa**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, INPE-8135-RPQ/717, 2001.
- MARKHAM, C. G. Apparent Periodicities in Rainfall at Fortaleza, Ceará, Brazil. **J. Appl. Meteor.**, v.13, p.176-179, 1974.
- MARKHAM, C. G.; MCLAIN, D. R. Sea Surface Temperature Related to Rain in Ceará, North-eastern Brazil, **Nature**, v.265, n.5592, p.320-323, 1977.
- MOURA, A. D.; SHUKLA, J. On the Dynamics of Droughts in Northeast Brazil: Observations, Theory, and Numerical Experiments with a General Circulation Model, **J. Atmos. Sci.**, v.38, n.12, p.2653-2675, 1981.
- NAMIAS, J. Influence of Northern Hemisphere Circulation on Drought in Northeast Brazil. **Tellus**, v. 24, p. 336-342, 1972.
- PEZZI, L. P.; CAVALCANTI, I. F. A. The Relative Importance of ENSO and Topical Atlantic Sea Surface Temperature Anomalies for Seasonal Precipitation over South America: A Numerical Study. **Climate Dyn.**, v.17, p.205-212, 2001.
- RAO, V. B.; CAVALCANTI, I. F. A.; HADA, K. Annual Variation of over Brazil, and Water Vapor Characteristics over South America. **J. Geophys. Res.**, v.101, n.D21, p.26539-26551, 1996.
- ROCHA, E. J. P. Balanço de Umidade e Influência de Condições de Contorno Superficiais Sobre a Precipitação da Amazônia. 2001. Tese (Doutorado em Meteorologia), **INPE**, São José dos Campos, 2001.
- ROPELEWSKI, C. F.; HALPERT, M. Global and Regional Scale Precipitation Patterns Associated with the El Niño Southern Oscillation. **Mon. Wea. Rev.**, v.115, p.1606-1626, 1987.
- SERVAIN, J. Simple Climatic for the Tropical Atlantic Ocean and Some Applications. **J. Geophys. Res.**, v.96, n.C8, p.15137-15146, 1991.
- SMITH, T. M., REYNOLDS, R. W.; LIVEZEY, R. E.; STOKES, D. C. Reconstruction of Historical Sea Surface Temperatures Using Empirical Orthogonal Functions. **J. Climate**, v.9, p.1403-1420, 1996.
- SPERBER, K. R.; HAMEED, S. Phase Locking of Nordeste Precipitation With Sea Surface Temperatures, **Geophys. Res. Lett.**, v.20, n.2, p.113-116, 1993.
- STRANG, D M. Análise Climatológica das Normais Pluviométricas do nordeste Brasileiro. São José dos Campos, CTA, **Relatório Técnico IAE - 02/72**, 1972.
- STRANG, D M. Utilização dos Dados Pluviométricos de Fortaleza, CE, Visando Determinar Probabilidades de Anos Secos e Chuvosos. São José dos Campos, CTA, **Relatório Técnico ECA - 03/79**, 1979.
- TEIXEIRA, L.; GIRARDI, C.; GUEDES, R. L. Resumo de Análises Sobre a Série Pluviométrica de Fortaleza – Ceará – Brasil. **Relatório Técnico ECA - 02/80**, 1980.
- TORRENCE, C.; COMPO, G. P. A Practical Guide to Wavelet Analysis. **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, v.79, n.1, p.61-78, 1998.
- TRENBERTH, K. E. The Definition of El Niño. **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, v.78, n.12, p.2771-2777, 1997.
- UVO, C. B; REPELLI, C. A.; ZEBIAK, S. E.; KUSHNIR, Y. The Relations between Tropical and Atlantic SST and Northeast Brazil Monthly Precipitation. **J. Climate**, v.11, p.551-562, 1998.