



XII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE

ESTUDO DE MODELOS DE PROJEÇÃO DE MÉDIO PRAZO PARA A SÉRIE DE PRECIPITAÇÕES NO ESTADO DO CEARÁ USANDO TRANSFORMADA DE *FOURIER*

*Cleiton da Silva Silveira¹ ; Francisco de Assis de Souza Filho²; Samuellson Lopes Cabral¹;
Wictor Edney Dajtenko Lemos¹ & Tyhago Aragão Dias¹*

RESUMO – Este trabalho tem por objetivo analisar a variabilidade climática da série temporal de precipitações para o Estado do Ceará e analisar como esta técnica projeta cenários futuros de 2 a 10 anos utilizando a transformada de *Fourier*. Para tanto, foram utilizados a precipitação pluviométrica observada da FUNCEME e SUDENE, sendo o período de 1912 a 2002 o período de calibração e 2003 a 2012 o período de verificação. Para a geração do modelo, a série é padronizada e em seguida utiliza-se o teste de Man Kendall-Sen, caso identificado tendência a mesma é filtrada. São selecionados os harmônicos de maior potência da série de *Fourier*, considerando que os mesmos são ortogonais, estes são usados para o modelo de projeção dado pela soma dos mesmos. Para avaliação de desempenho é feita uma análise qualitativa da distribuição de probabilidades acumulada do período de anos projetados. O espectro de potência de Fourier mostrou quatro harmônicos mais energéticos, dois deles na escala de baixa frequência e dois na escala de média frequência. O modelo identificou a função de distribuição de probabilidades dos anos projetados, indicando que esta metodologia capta a variabilidade de médio prazo.

ABSTRACT– The objective of this work is to analyze the temporal variability of precipitation for the State of Ceará and analyze projections from 2 to 10 years into the future utilizing the Fourier transformation. Methodology utilized precipitation observations from the Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos and the Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste from 1912 to 2002, as well as a calibration period from 2003 to 2012. To generate the model, Man Kendall-Sen test is applied to identify and filter any trends. The primary harmonics of the Fourier series are selected and, if orthogonal, used in the model. To evaluate the effectiveness of the model, qualitative analysis of the distribution of accumulated probabilities of the projected period was used, showing four principal harmonics, two in the low-frequency domain and two in the medium-frequency domain. The model identified the distribution function for these probabilities during the projected years, indicating that the methodology presented in this paper effectively captures variability in the medium-frequency domain.

1) Doutorando em Recursos Hídricos no Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental - Universidade Federal do Ceará. Campus do Pici, Bloco 713. Telefone: (85) 33669623; Fax: 33669627; cleitonsilveira16@yahoo.com.br

2) Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental - Universidade Federal do Ceará. Campus do Pici, Bloco 713. Telefone: (85) 33669623;

1 INTRODUÇÃO

A grande variabilidade climática exerce uma forte influência no desenvolvimento da sociedade, devido às enchentes, às secas, às catástrofes, dentre muitos outros fatores que interferem diretamente no meio ambiente, na agricultura, no setor energético, na qualidade do ar etc. Diante disso, análise da variabilidade de séries temporais e as possíveis projeções na escala de décadas podem se tornar uma informação muito útil para o planejamento e gestão de recursos hídricos, desde que as incertezas inerentes a esse tipo de análise sejam incorporadas ao longo da projeção.

A análise de séries hidrológicas demanda informações sobre tendências e padrões de variações de baixa frequência do clima (décadas a séculos). O clima das próximas décadas depende tanto de variações climáticas naturais como das forças antropogênicas. Projeções climáticas decadais devem tentar cobrir a lacuna entre a previsão sazonal/interanual com prazos de dois anos ou menos e projeções de mudanças climáticas de um século à frente. Não há nenhuma teoria amplamente aceita para esse tipo de projeção, nem se sabe se a sua evolução passada é a chave para seu futuro. Existem, contudo, controles de baixa frequência, associados aos lentos processos oceânicos, que podem conferir certa previsibilidade ao clima na escala decenal, principalmente na região tropical.

Com o aumento da extensão de registros das séries históricas, diversos estudos analisam a estrutura de baixa frequência do clima (por exemplo, oscilações El Niño- Oscilação Sul-ENOS, Oscilação Decadal do Pacífico-ODP e Oscilação do Atlântico Norte-OAN) e têm procurado desenvolver cenários de vazões considerando essa variabilidade (KEPPENNE & LALL, 1996; KNOW *et al.*, 2007).

O clima do Nordeste do Brasil (NEB) responde muito bem às mudanças de temperatura da superfície do Oceano Pacífico tanto na escala interanual como na escala decadal (CAVALCANTI *et al.*, 2009). Na escala interanual (de dois a quatro anos), é o fenômeno El Niño que, em geral, produz seca no Nordeste e excesso de chuvas no Sul/Sudeste do país. Na escala decadal, as temperaturas das superfícies dos oceanos ficam mais aquecidas durante 20 a 30 anos e, em seguida, se resfriam durante outros 20 a 30 anos, um ciclo total de 50 a 60 anos. Quando o Pacífico se resfriou, entre 1947 e 1976, as chuvas se reduziram no Nordeste e os Estados da costa leste tiveram chuvas abaixo da média de longo prazo durante praticamente 11 anos consecutivos.

Este trabalho tem por objetivo analisar a variabilidade climática da série de precipitação para o Estado do Ceará utilizando a transformada de *Fourier*.

2 METODOLOGIA

Esta seção apresenta detalhes da metodologia utilizada para geração do modelo baseado na série de Fourier e os dados utilizados para a geração do mesmo.

2.1. Dados Utilizados

Para avaliar a destreza dos modelos e efetuar as devidas calibrações foram utilizadas a base de dados de precipitação pluviométrica observada da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) e SUDENE (Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste) para o período de 1912 à 2012 para o Estado do Ceará.

2.2. O modelo baseado na série de *Fourier*

A análise de Fourier ou análise harmônica é uma das formas mais tradicionais para tratamento de sinais e séries temporais. Esta técnica foi criada por Jean Baptiste Joseph Fourier e publicada em 1822 no seu trabalho intitulado *Thèorie Analitique de la Chaleur*. Essencialmente, ela permite que se observem informações de frequência invés de tempo.

Na análise de séries temporais, resultado da observação de processos estocásticos, normalmente se utiliza a transformada discreta de Fourier, tendo como objetivo básico o de aproximar uma função do tempo por uma combinação linear de harmônicos (componente senoidais).

Em 1827, Joseph Fourier afirmou (BOLZAN, 2004), na sua teoria de análise de frequências, que qualquer função periódica $f(x)$ poderia ser obtida, de maneira aproximada, pela somatória de funções senoidais:

$$f(x) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos(kx) + b_k \text{sen}(kx)) \quad (1)$$

Onde: a_0 , a_k e b_k são constantes dadas por:

$$a_0 = \frac{2}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) dx \quad (2)$$

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos(kx) dx \quad (3)$$

$$b_k = \frac{2}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin(kx) dx \quad (4)$$

2.2.1. A geração do modelo baseado na série de Fourier

A transformada de Fourier é uma transformada reversível, porém não há informação de frequência disponível no domínio do tempo da série ou sinal, com isso não há informação de tempo disponível na transformada de Fourier do sinal. Ou seja, através da informação da transformada do sinal fornecido é possível estimar quanto de cada frequência existe no sinal, mas isso não informa desde quando no tempo estas componentes de frequência existem. Esta informação não é necessária quando o sinal é estacionário (sinais cujo conteúdo de frequência não muda com o tempo).

Um processo é estacionário se ele se desenvolve no tempo, de modo que a escolha de uma origem dos tempos não seja importante, as características probabilísticas são as mesmas ao longo da série temporal (MORETTIN, 1999). Nesse caso, todas as componentes de frequência existem o tempo todo. Para tornar mais sutil essa suposição nas séries de vazões e precipitação é feito o teste de tendência de Man Kendall-Sen com nível de significância de 95%, caso hipótese de tendência seja confirmado a mesma é retirada da série para em seguida ser usada a transformada de *Fourier*.

2.2.2. A geração do modelo baseado na série de Fourier

A representação da série de Fourier de u_τ , denotada por \hat{u}_τ , pode ser obtida pela equação 6:

$$\hat{u}_\tau = \bar{u} + \sum_{j=1}^h \left[A_j \cos\left(\frac{2\pi j \tau}{\omega}\right) + B_j \sin\left(\frac{2\pi j \tau}{\omega}\right) \right], \tau = 1, \dots, \omega \quad (6)$$

Onde \bar{u} é média de u_τ , A_j e B_j são os coeficientes da série de Fourier, j é o harmônico e h é o número total de harmônico. Sendo h igual a $\frac{\omega}{2}$ (em caso de ω par) ou $\frac{\omega-1}{2}$ (em caso de ω ímpar). Para a análise das séries temporais o ω é exatamente igual ao número total de anos usados para a calibração.

Sendo,

$$\bar{u} = \frac{1}{\omega} \sum_{\tau=1}^{\omega} u_{\tau} \quad (7)$$

$$A_j = \frac{2}{\omega} \sum_{\tau=1}^{\omega} u_{\tau} \cdot \cos\left(\frac{2\pi j\tau}{\omega}\right), j = 1, \dots, h. \quad (8)$$

$$B_j = \frac{2}{\omega} \sum_{\tau=1}^{\omega} u_{\tau} \cdot \text{sen}\left(\frac{2\pi j\tau}{\omega}\right), j = 1, \dots, h. \quad (9)$$

Onde \hat{u}_{τ} da equação X é calculado inicialmente usando todos os harmônicos $j = 1, \dots, h$ (todos os coeficientes A_j e B_j , espera-se que \hat{u}_{τ} seja aproximadamente igual a z_{τ} para todos os valores de $\tau = 1, \dots, \omega$).

Para realizar as projeções usando essa técnica são selecionados alguns harmônicos $h^* < h$ (aqueles que possuem maior significância, ou seja, aqueles que mais contribuem para a variabilidade da série temporal). A seleção dos h^* é feita pela análise do espectro de potência da série de Fourier.

Sendo a série de Fourier projetada baseada na equação 6 com uso apenas dos h^* .

2.3. Avaliação de desempenho do modelo

Após calcular as projeções de precipitações para a região de interesse, é necessário avaliar o desempenho dos modelos propostos. Para os modelos baseados na série de *Fourier* é usada a análise qualitativa da distribuição de probabilidades acumulada do período de anos previstos.

3. RESULTADOS

Na Figura 1 é mostrado o espectro global de potência da série observada de precipitação anual usando a transformada de *Fourier* em função da frequência. O espectro mostra oscilações em diversas escalas de frequência, porém há quatro harmônicos que apresentam maior potência, dois deles na escala de baixa frequência (0,0989 e 0,0769 anos⁻¹) e dois na escala de média a baixa frequência (0,1758 e 0,2308 anos⁻¹). Esses harmônicos foram utilizados para a geração do modelo, os mesmos são mostrados na Tabela 1, juntamente com os seus respectivos coeficientes da série de Fourier.

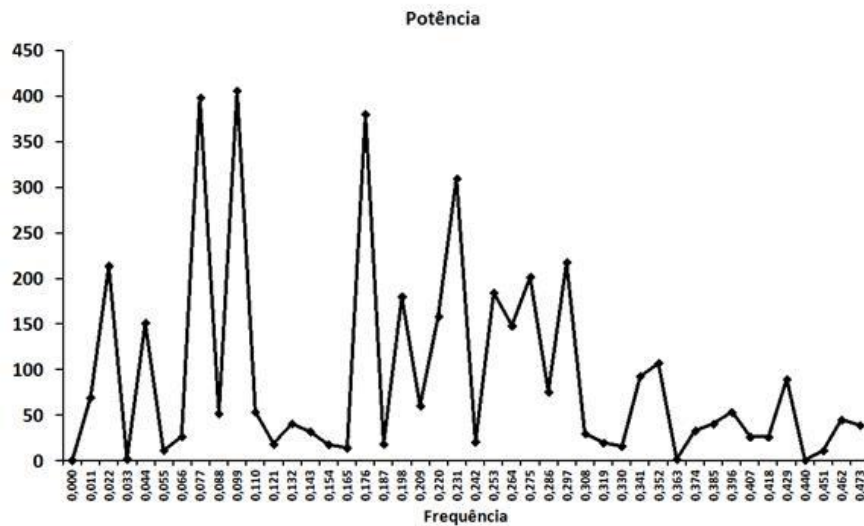


Figura 1 - Espectro de potência da precipitação anual normalizada para o estado do Ceara usando transformada de Fourier.

Tabela 1 - Coeficientes de Fourier para os harmônicos selecionados para construção do modelo baseado em Fourier.

A	B	Frequência do Harmônico
0,0159	0,4424	0,0989
0,1770	-0,4013	0,0769
0,2277	-0,3630	0,1758
0,3520	0,1605	0,2308

Na Figura 2 é mostrada a série observada de precipitação e a série de *Fourier* com os quatro principais harmônicos para o período de calibração (1912 a 2002). O modelo consegue capturar a variabilidade da precipitação no Estado do Ceará, porém subestima alguns dos principais máximos de precipitação em mais de um desvio padrão.

Na Figura 3 são mostrados os harmônicos utilizados para a construção do modelo baseado na série de Fourier e suas respectivas projeções. O harmônico 1 (de maior potência) possui período de aproximadamente 10,33 anos, enquanto o harmônico 2 possui período em torno 13 anos, ambos apresentaram inversões de fase ao longo do período previsto. Enquanto na Figura 4 é mostrada a composição da projeção com base nos harmônicos selecionados, o modelo consegue capturar a fase do período previsto, com patamares semelhantes aos valores de precipitação observada.

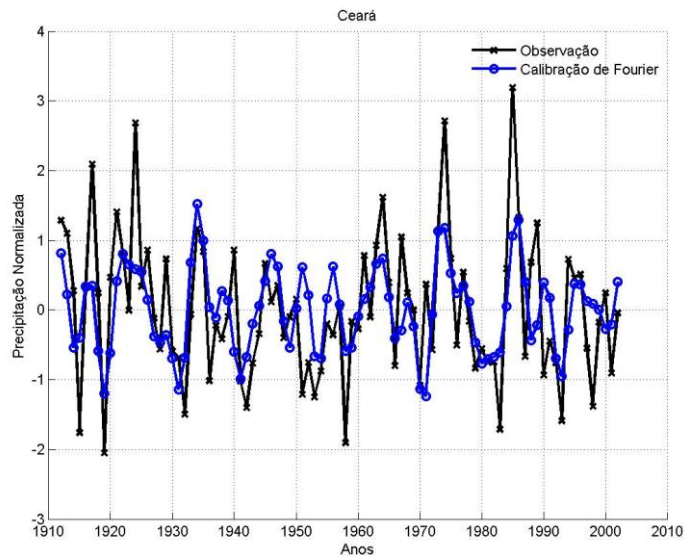


Figura 2 - Calibração do modelo FA para o período de 1912 a 2002.

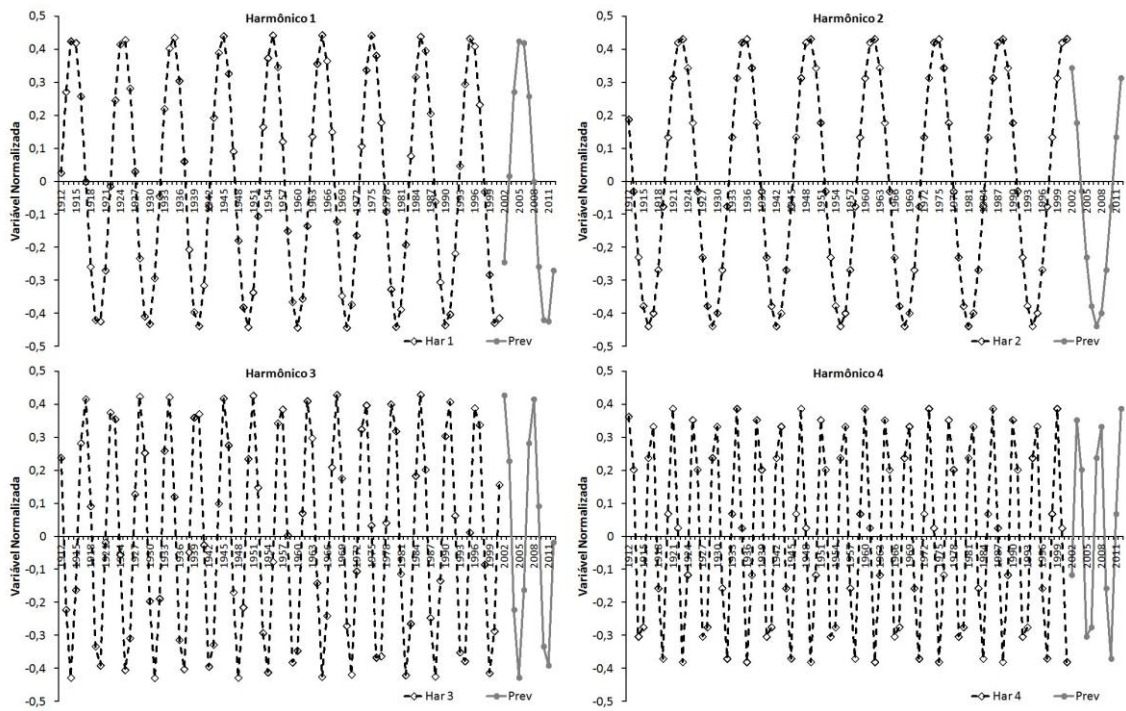


Figura 3 - Harmônicos utilizados para a construção do modelo baseado na série de Fourier e suas respectivas projeções

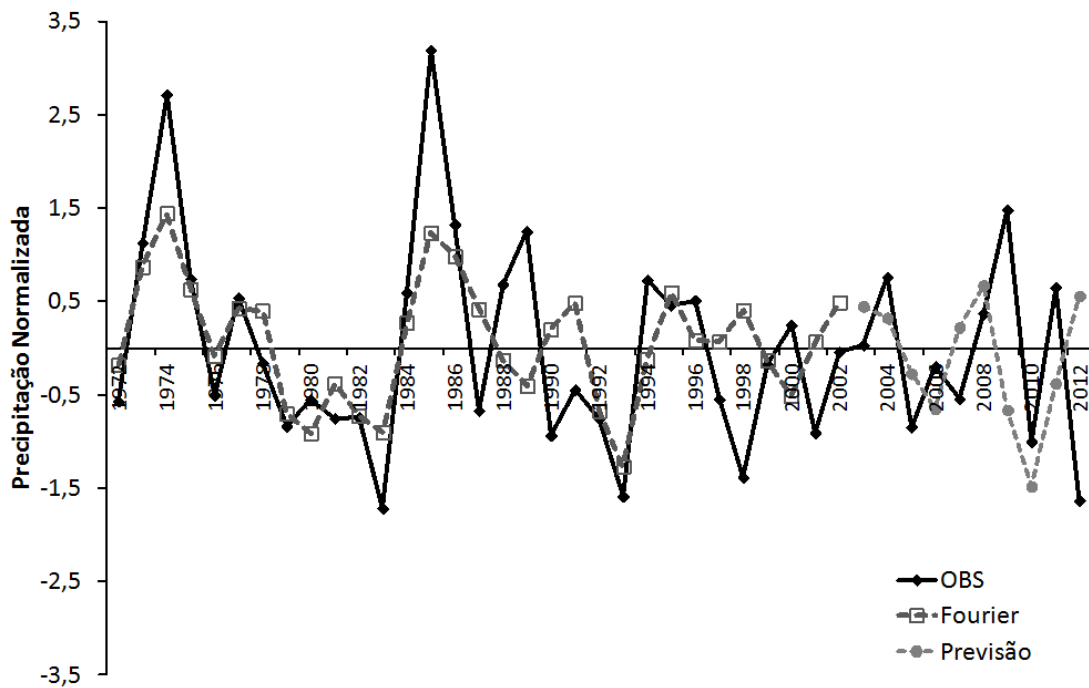


Figura 4 - Previsão composta pelos quatro harmônicos selecionados.

Na Figura 5 são mostradas comparações entre as funções de distribuição de probabilidade acumulada (CDF) previstas pelo modelo FA, a climatologia e a observação para diferentes horizontes de previsão. Em todos os horizontes mostrados há uma clara redução da variância em relação à climatologia, para os horizontes de 4, 5 e 6 anos o modelo apresenta-se muito próximo a CDF observada, indicando que essa informação pode ser utilizada no planejamento de médio prazo. Nos demais horizontes analisados o modelo subestima os eventos de precipitação mais elevadas, principalmente para os horizontes de 9 e 10 anos.

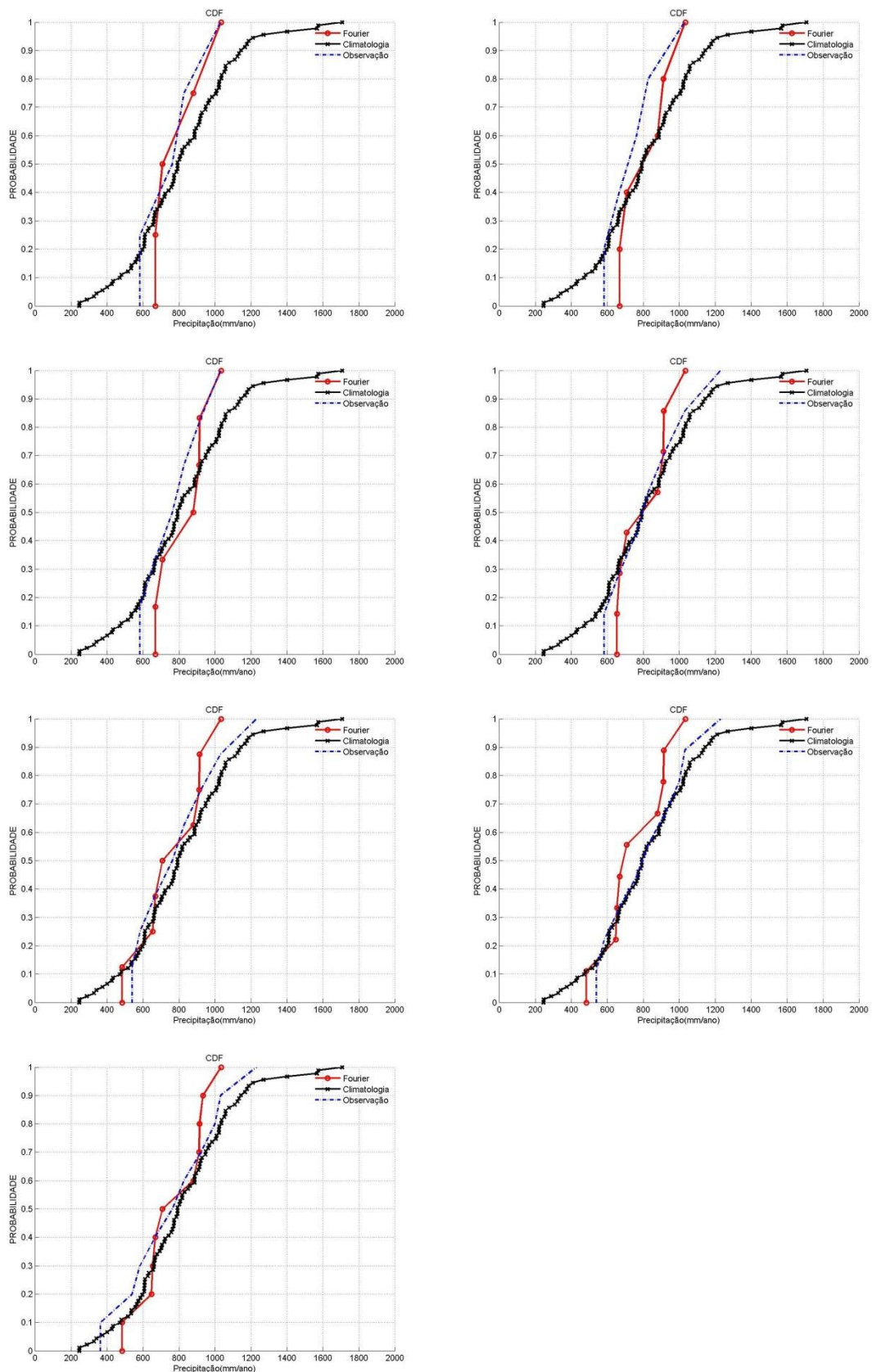


Figura 5 - Comparação entre as funções de distribuição de probabilidade acumulada previstas pelo modelo FA, a climatologia e a observação para diferentes horizontes de previsão. Da esquerda para a direita e de cima para baixo os seguintes horizontes de previsões.

4. CONCLUSÕES

A série histórica de precipitações sobre o Ceará não apresentou tendência significativa, segundo o método de Man-Kendall Sen. A série mostra alternância entre períodos de sequenciais de anos secos e outros intervalos com sequência de anos úmidos. Essa variabilidade pode estar associado a variação dos padrões do comportamento da temperatura da superfície do mar do oceano Pacífico.

A transformada de *Fourier* mostra padrões de baixa frequência (entre 10 e 13 anos) e na escala de média a baixa frequência (entre 4 e 7 anos), ou seja, ela apresenta oscilações em várias escalas de tempo.

A variabilidade dos principais harmônicos de Fourier indicam padrões de variação semelhante à TSM do pacífico, podendo esse ser um dos fatores relevantes para tal variabilidade temporal das precipitações.

O modelo baseado na série de *Fourier* funcionou para identificação da CDF no período de projeção para a série de precipitações no Ceará, entretanto mais testes devem ser realizados com um maior número de séries históricas.

5. BIBLIOGRAFIA

BOLZAN, M. J. A. Análise da transformada em ondeletas aplicada em sinal geofísico. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 26, n. 1, p. 37-41, 2004.

CAVALCANTI, A. I. F. et al. **Tempo e Clima no Brasil**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

KEPPENNE, C. L.; LALL, U. Complex singular spectrum analysis and multivariate adaptive regression splines applied to forecasting the Southern Oscillation. **Exp. Long Lead Forecast Bull.**, v. 5, p. 54-56, 1996.

KWON, H. H.; LALL, U.; KHALIL, A. F. Stochastic simulation model for nonstationary time series using an autoregressive wavelet decomposition: Applications to rainfall and temperature. **WATER RESOURCES RESEARCH**, v. 43, p. 1-15, 2007.

MORETTIN, P. A. **Ondas e ondaletas: da análise de Fourier à análise de ondaletas**. EDUSP, 1999.