



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MARCELO LEÃO NOGUEIRA

CONSTRUÇÃO DE CENÁRIOS DE REGIME DE CHUVAS NO ESTADO
DO CEARÁ: APLICABILIDADE DE ANÁLISE DE FOURIER

FORTALEZA
2011

Marcelo Leão Nogueira

**CONSTRUÇÃO DE CENÁRIOS DE REGIME DE CHUVAS NO
ESTADO DO CEARÁ: APLICABILIDADE DE ANÁLISE DE FOURIER**

**Dissertação apresentada ao Curso de
Mestrado em Recursos Hídricos da
Universidade Federal do Ceará como
requisito parcial para a obtenção de grau de
Mestre.**

Orientadora: Prof. Ticiano M. de Carvalho Studart

FORTALEZA – CE

2011

Esta Dissertação foi submetida como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Mestre em Recursos Hídricos, outorgado pela Universidade Federal do Ceará, e encontra-se à disposição dos interessados na Biblioteca Central da referida Universidade.

A citação de qualquer trecho desta Dissertação é permitida, desde que seja feita de acordo com as normas da ética científica.

nome do aluno

Dissertação aprovada em __.__.2010

Prof^a. Ticiania M. de Carvalho Studart (orientadora), Doutora
Universidade Federal do Ceará

Prof. Francisco de Assis de Souza Filho, Doutor
Universidade Federal do Ceará

Prof^o. Wilson Fadlo Curi, Doutor
Universidade Federal de Campina Grande

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho as pessoas que contribuíram de alguma forma na sua realização, mesmo com apenas palavras encorajadora e de incentivo nessa caminhada difícil que é a vida acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que fazem ou fizeram parte da minha vida de alguma forma e mesmo que não sejam citados nestas humildes páginas sintam-se agradecidos.

Agradeço aos meus amigos e amigas que fizeram parte da minha Graduação de Matemática. Ao Breno, Gláucio e Wilker. Em especial a Denize e família, pois além de ser uma excelente pessoa e amiga é um exemplo de superação.

Aos amigos e amigas graduados em Física. Ao Linconly, especialmente a Ideolinda e seu marido Anax, por além de serem meus amigos, por me acolherem em sua rica bênção casa me dando a oportunidade de estar em um ambiente harmonioso para que eu pudesse escrever minha dissertação com calma e dedicação merecida. A minha amiga doutoranda Alrenice Castro, conhecida como Lena, por sua amizade e com sua experiência profissional como professora universitária me ajudou na construção deste trabalho atuando praticamente como co-orientadora e dando aquele "puxão de orelha".

Ao Marcelo Schneider, futuro marido da Lena, que mesmo de longe me auxiliou tirando dúvidas através de emails e telefonemas.

Agradeço ao professores do Departamento de Engenharia Hidráulica e Saneamento Ambiental e em especial ao professor Assis, pois sua inteligência e imensa dedicação ao trabalho servem de exemplo para todos nós.

Ao professor Marcos Aurélio que através de suas palavras honestas e de incentivo, mesmo ser perceber, me deu ânimo para continuar trilhando meu caminho na vida acadêmica. A professora Renata por me auxiliar em momentos de dificuldade e me admitir em seus projetos.

E claro a minha orientadora, Ticiane Studart, por suas palavras sábias e por me acolher como seu orientando e acreditando em minha capacidade e dedicação aos estudos. E ao professor Wilson Curi pelo seus esclarecimentos na correção da dissertação.

Não posso deixar de agradecer aos funcionários do departamento que sempre estavam dispostos a me ajudarem e, em especial, a Teresinha Alves pelas conversas que tínhamos que contribuíram muito durante meus estudos. Agradecimentos a Edjane que trabalhou anos na secretaria do LEHIDRO (Laboratório de Estudos de Recursos Hídricos) e que hoje segue seu rumo como educadora física.

A todos os amigos e amigas que conquistei nesses anos de mestrado. Em especial, meus agradecimentos aos amigos Danilo, José Wilker e João Marcelo, por serem exemplos de competência e dedicação aos estudos, e a minha amiga peruana Yvonne por sua companhia nos horários de almoço e pelas conversas em espanhol, já que é o idioma que eu mais gosto.

Agradeço a família que, de alguma forma, me auxiliaram na minha formação intelectual, moral e ético.

Agradecimento a FUNCAP, pelo financiamento concedido por um período de tempo.

RESUMO

O Estado do Ceará, localizado no Nordeste do Brasil, possui um sistema climatológico diferenciado das outras regiões, sendo objeto de vários estudos sobre o regime de chuva peculiar que ocorre no Estado. Para melhor entendimento desse regime, o Estado foi dividido em Macrorregiões Homogêneas de chuva através de estudos realizados pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUCEME). Com intuito de caracterizar e construir possíveis cenários em relação ao nível de chuva foi selecionado postos pluviométricos dessas macrorregiões para aplicação de uma ferramenta matemática chamada Análise de Fourier. Esta análise auxilia na caracterização de uma região através da transformada de Fourier, que transforma os dados de uma série temporal em dados em frequência dando oportunidade de verificar o comportamento da variabilidade de cada macrorregião. Resultados, baseado nos dados de precipitação dos postos selecionados, mostram que a ferramenta matemática é eficaz na caracterização da região em estudos climatológicos gerando indícios que, para regiões mais próximas do litoral, a curva de frequência possui características menos irregulares. Os postos mais ao leste do Estado, apesar de estarem em Macrorregiões diferentes, possuem certa semelhança em suas variabilidades. Em relação à Macrorregião Sertão Central os resultados mostram que tal macrorregião tem uma característica peculiar sugerindo um estudo específico para esta localidade. A Análise de Fourier também gera possíveis cenários em relação ao nível pluviométrico para os próximos anos. No entanto, os cenários obtidos apresentaram altas variações em seu comportamento indicando anos de extrema escassez, logo após anos de extrema abundância em relação à média no nível de chuva da macrorregião. Tal variação pode ser explicada devido ao alto índice de variabilidade pluviométrica que ocorre ano a ano no Estado do Ceará

É relevante ressaltar que a Análise de Fourier demonstra ser uma ferramenta consistente em seu método e dependendo das circunstâncias e variáveis em estudos apresentam resultados satisfatórios ou não.

Palavras – chave: Séries Temporais, Análise de Fourier, Precipitação (Meteorologia) Variabilidade

Abstract

Located in the Northeast of Brazil, the state of Ceará has a different climatical system from other regions, and it has been widely studied about the peculiar rain regime . To understand that regime, the state was divided into homogeneous rain macro-regions for the studies done by Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUCEME). In order to characterize and build possible sceneries related to the rain level, pluviometrical places were selected in those macrorregiões to apply a mathematical tool called Fourier Analysis, which helps to turn the data of a time series into frequency data, what allows to verify the behavior of the variability in each macro-regions. Results based on the precipitation data of the selected places have showed that the tool is effective in the characterization of the region in climatical studies, briefly indicating that creating for regions closer to the shore, the frequency curve has less irregular features. The eastern places are a little similar in their variability, although they are in different macro-regions. When it comes to the macro-region in the Central Countryside, the results showed that the place had a peculiar feature, and a specific study for that region was suggested. The Fourier Analysis also creates possible sceneries related to the pluviometrical level in the next years. Nevertheless, the sceneries studied presented high level of variation in their behaviour, indicating years of extreme scarcity, and right after that extreme abundance in relation to the average of the rain level in that region. That variation may be explained by the high pluviometrical variability rate, which occurs every year in the state of Ceará.

It is also relevant to point out that the Fourier Analysis seems to be a consistent tool in its methodology and may show satisfying results dependin on the variables and the circumstances.

Keywords: Time Series, Fourier Analysis, Precipitation (Meteorology) Variability

Conteúdo

1 - INTRODUÇÃO	15
1.1 - Colocação do Problema	15
1.2 - Objetivos	16
1.3 - Organização do trabalho	16
2 - REVISÃO DA LITERATURA	17
2.1 – Aspectos Climatológicos do Nordeste Brasileiro.....	18
2.2 – Macrorregiões Homogêneas de Chuva no Estado do Ceará	23
2.3 – Análise de Séries Temporais	24
2.4 – A análise de Fourier	26
2.5 – A Análise em Ondeleta	30
2.6 - Modelo de Box e Jenkins	35
CAPÍTULO 3	38
3 - METODOLOGIA	38
3.1 - Dados utilizados.....	38
3.2 - Aplicação de Análise de Fourier em Séries Pluviométrica.....	41
4 - RESULTADOS	44
4.1 – ANÁLISE DE FOURIER PARA AS REGIÕES HOMOGÊNEAS.....	44
4.1.1 - Região da Ibiapaba - Posto de Guaraciaba do Norte	44
4.1.2 – Região Litoral de Fortaleza - Posto de Caucaia	46
4.1.3 – Região do Cariri - Posto de Crato	47
4.1.4 – Região do Jaguaribe - Posto de Jaguaruana	49
4.1.5 – Região do Sertão Central - Posto de Campos Sales	51
4.1.6 – Região do Sertão Central - Posto de Senador Pompeu	52
4.1.7 – Região Litoral Pecém - Posto de Acarape.....	54
4.2 – CENÁRIOS.....	56
4.3 – CÁLCULOS DE INCERTEZAS	60
4.4 - TESTE DO MÉTODO UTILIZADO	65
5 - CONCLUSÕES	70
5.1 – Conclusões finais.....	70
5.2 – Perspectivas futuras.....	71
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72

TABELAS

Tabela 3.1: A localização dos postos das macrorregiões estudados.

Tabela 4.1: Valores das variâncias e a relação entre elas.

FIGURAS

FIGURA 2.1 - Imagem do satélite METEOSAT 5, setorizada, no canal infravermelho, ilustrativa da ZCIT influenciando o setor norte do NEB em 15/03/94 às 18:00 TMG (Fonte: MELO, 1997).

FIGURA 2.2 - Imagem de Satélite GOES-12, no canal Infravermelho, no dia 06 de janeiro de 2009, às 19h15min do horário de Brasília (Fonte: INMET, 2009).

FIGURA 2.3 - Imagem de Satélite GOES-12, no canal Infravermelho, no dia 01 de julho de 2008, 24hs do horário de Brasília (Fonte: INMET, 2009).

FIGURA 2.4 – Macrorregiões Homogêneas de Chuvas (Fonte: XAVIER,2001)

FIGURA 3.1 – As macrorregiões e sua localização geográfica dos postos (Fonte: Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos – FUCEME).

FIGURA 3.2 – Programa ORIGIN versão 6.0

FIGURA 3.3 – Programa ORIGIN versão 6.0

FIGURA 3.4 – Programa ORIGIN versão 6.0

FIGURA 4.1 – Série de precipitação total anual para o posto de Guaraciaba do Norte (1912 – 2007).

FIGURA 4.2 – Espectro da FFT para a série temporal dos totais anuais, região do posto de Guaraciaba do Norte.

FIGURA 4.3 – Filtro passa banda para a série temporal do posto de Guaraciaba do Norte.

FIGURA 4.4 – Série de precipitação total anual para o posto de Caucaia (1912 – 2007)

FIGURA 4.5 – Espectro da FFT para a série temporal dos totais anuais, região do posto de Caucaia.

FIGURA 4.6 – Filtro passa banda para a série temporal do posto de Caucaia.

FIGURA 4.7 – Série temporal dos totais anuais, região do posto de Crato

FIGURA 4.8 – Espectro da FFT para a série temporal dos totais anuais, região do posto de Crato.

FIGURA 4.9 – Filtro passa banda para a série temporal do posto de Crato.

FIGURA 4.10 – Série de precipitação total anual para o posto de Jaguaruana (1912 – 2007)

FIGURA 4.11 – Espectro da FFT para a série temporal dos totais anuais, região do posto de Jaguaruana.

FIGURA 4.12 – Filtro passa banda para a série temporal do posto de Jaguaruana.

FIGURA 4.13 – Série de precipitação total anual para o posto de Campos Sales (1912 -2007)

FIGURA 4.14 – Espectro da FFT para a série temporal dos totais anuais, região do posto de Campos Sales.

FIGURA 4.15 – Filtro passa banda para a série temporal do posto de Campos Sales.

FIGURA 4.16 – Série de precipitação total anual para o posto de Senador Pompeu (1912 - 2007).

FIGURA 4.17 – Espectro da FFT para a série temporal dos totais anuais, região do posto de Senador Pompeu

FIGURA 4.18 – Filtro passa banda para a série temporal do posto de Senador Pompeu.

FIGURA 4.19 – Série de precipitação total anual para o posto de Senador Acarape (1912 – 2007)

FIGURA 4.20 – Espectro da FFT para a série temporal dos totais anuais, região do posto de Acarape.

FIGURA 4.21 – Filtro passa banda para a série temporal do posto de Senador Pompeu.

FIGURA 4.22 – Cenário para o posto do Crato com valores padronizados.

FIGURA 4.23 – Cenário para o posto do Senador Pompeu com valores padronizados

FIGURA 4.24 – Cenário para o posto de Campos Sales com valores padronizados

FIGURA 4.25 – Cenário para o posto do Caucaia com valores padronizados

FIGURA 4.26 – Cenário para o posto do Acarape com valores padronizado

FIGURA 4.27 – Cenário para o posto do Jaguaruana com valores padronizados

FIGURA 4.28 – Cenário para o posto do Guaraciaba do Norte com valores padronizados

FIGURA 4.29 – Gráfico dos valores observados e cenário do posto de Acarape com valores padronizados

FIGURA 4.30 – Gráfico dos valores observados e cenário do posto de Campos Sales com valores padronizados

FIGURA 4.31 – Gráfico dos valores observados e cenário do posto de Caucaia com valores padronizados

FIGURA 4.32 – Gráfico dos valores observados e cenário do posto de Crato com valores padronizados

FIGURA 4.33 – Gráfico dos valores observados e cenário do posto de Guaraciaba do Norte com valores padronizados

FIGURA 4.34 – Gráfico dos valores observados e cenário do posto de Jaguaruana com valores padronizados

FIGURA 4.35 – Gráfico dos valores observados e cenário do posto de Senador Pompeu com valores padronizados

FIGURA 4.36 – Gráfico do erro do posto de Acarape

FIGURA 4.37 – Gráfico do erro do posto de Campos Sales.

FIGURA 4.38 – Gráfico do erro do posto de Caucaia

FIGURA 4.39 – Gráfico do erro do posto de Crato

FIGURA 4.40 – Gráfico do erro do posto de Guaraciaba do Norte

FIGURA 4.41 – Gráfico do erro do posto de Jaguaruana

FIGURA 4.42 – Gráfico do erro do posto de Senador Pompeu

CAPÍTULO 1

1 - INTRODUÇÃO

1.1 - Colocação do Problema

O estudo do comportamento e da periodicidade do regime pluviométrico em uma determinada região pode oferecer indícios tanto para a escolha da de modelagem matemática mais apropriada, bem como prover uma caracterização mais robusta da região e os ciclos que dominam tais regimes. A maior parte das informações hidro-meteorológicas advêm de estudos realizados e baseados em diagnósticos, previsões numéricas ou estatístico-estocásticas. Estes estudos podem também, serem usados para caracterizar um regime pluviométrico em função de dados coletados ao longo do tempo em pontos distintos de uma mesma região sob a forma de séries temporais (BRABO, 2008).

Devido à complexidade que envolve as variáveis que compõem o fenômeno da precipitação, muitas das séries temporais apresentam um caráter irregular em seus ciclos. Tal irregularidade cria diversos obstáculos para um estudo mais detalhado sobre como o modo e a variabilidade deste regime contribuem para a dinâmica hidro-meteorológica envolvida nos processos observados através dos dados coletados desta variável numa dada região.

Algumas observações trazem à tona a importância das características físicas e geológicas da região na análise realizada com base nos dados de séries históricas de precipitação. Neste contexto, a região Nordeste do Brasil (NEB), de clima semi-árido, possui em especial, uma atividade hidrológica peculiar, no tocante a estas dificuldades observadas na evolução temporal dos registros históricos das séries temporais pluviométricas utilizadas em diversos estudos.

A importância de caracterizar as variabilidades e construção de cenários em relação ao nível de precipitação está em melhor entender aspectos da região no que se refere à distribuição da precipitação ocorrente no Estado, na adequação da sociedade, com relação ao uso da água, na produção agrícola e na própria retenção de água através de pequenas barragens ou em grandes construções, como a obra do Castanhão, para ter um maior controle sobre o uso dessa água. Para realizar tais estudos faz-se necessário ter os registros pluviométricos, em especial, em relação ao Estado do Ceará, que apresenta uma grande irregularidade espaço-temporal de precipitação e concentradas em quatro meses do ano. Vale

salientar que a região tem uma configuração geológica na qual mais de 70% de seu território apresenta uma estrutura cristalina, apresentando pouca retenção de água e elevado escoamento superficial, e climas que vão do semi-árido (BRABO, 2008).

1.2 - Objetivos

Construir cenários em relação aos regimes pluviométricos no Estado do Ceará, com dados obtidos através de postos selecionados por macrorregião, através de uma ferramenta matemática, que tem grandes aplicabilidades em diversas áreas do conhecimento, chamada de Análise de Fourier. Após a calibração do modelo é possível criar cenários em relação ao nível de chuva para os anos seguintes.

1.3 - Organização do trabalho

O trabalho foi organizado em cinco capítulos. O capítulo I, a introdução, a colocação do problema, os objetivos e a maneira de como o trabalho foram organizados.

O capítulo II trata, na primeira parte do capítulo, da revisão bibliográfica de trabalhos realizados anteriormente mostrando os resultados e a importância dos mesmos. A segunda parte apresenta os aspectos climatológicos que influenciam o regime de chuva do Estado do Ceará, assim como, a forma de divisão do Estado em macrorregiões. A terceira parte mostra a definição e as características das séries temporais e também o método de análise aplicado neste trabalho, no caso, Análise de Fourier, suas definições e ferramentas.

O capítulo III apresenta os dados obtidos do site da Agência Nacional de Águas (ANA) e descreve a metodologia aplicada, assim como a ferramenta computacional utilizada, ORIGIN 6.0, para obtenção de resultados.

O capítulo IV apresenta os resultados: mostra a Análise de Fourier para as regiões homogêneas possibilitando a caracterização da região em sua variabilidade, os possíveis cenários e o teste aplicado ao método para averiguar sua eficácia.

E finalmente, o capítulo V apresenta as conclusões finais e as perspectivas de futuros trabalhos de pesquisa.

CAPÍTULO 2

2 - REVISÃO DA LITERATURA

CHIERICE (2003) estudou séries temporais pluviométricas no Estado de São Paulo utilizando técnicas espectrais com o objetivo de retratar os principais padrões observados num sistema de grande complexidade. Em seu trabalho foram utilizados 16.771 registros diários de chuvas, medidos em milímetros (mm), objetivando enfatizar o uso de alguns métodos recentes como a transformada em ondeleta e o filtro de Fourier, que foram utilizados para obter informações e propriedades de longo alcance do sistema. A importância dada pela autora, em relação ao uso de tais técnicas, foi mostrar que, para diferentes métodos estatísticos, foram obtidos os mesmos resultados, sendo que, para sistemas complexos, isto é um fato significativo.

GIRADI et al. (2001) estudaram a problemática da seca no NEB associando à causa principal com a questão estrutural climática do planeta. Os autores observaram que a região, devido a sua posição geográfica, está sob a ação de vários fenômenos atmosféricos e oceanográficos, tais como o anticiclone semi-permanente do Atlântico Sul, que prejudica a formação de nuvens de chuva. Neste trabalho, os autores procuraram comprovar que o regime pluviométrico presente nos períodos de chuvas escassas, poderia indicar a projeção de estiagem, através de análise e da filtragem estocástica clássica de Fourier.

AZEVEDO et al. (1998) dividiram o período chuvoso do Estado do Ceará em duas partes com regimes distintos e verificaram a contribuição das mesmas para o total pluviométrico da estação chuvosa em cada macrorregião utilizando, em sua pesquisa, ferramentas matemático-estatísticas sobre dados totais diários de chuva de vários postos pluviométricos. Os autores utilizaram a metodologia proposta por SILVA (1998), para uma eficiente estimativa de valores máximos e mínimos de pluviometria da segunda metade da estação chuvosa, obtendo assim índices do padrão dos regimes, principalmente no caso dos valores mínimos.

MOURA et al. (2009) tiveram como objetivo correlacionar a precipitação de um conjunto de postos homogêneos do setor leste do Nordeste do Brasil (NEB) com anomalia de Temperatura da Superfície do Mar (ATSM) verificando possíveis áreas de influências nas chuvas dessa região. Os autores detectaram, durante as análises estocásticas, que os regimes possuíam modos do tipo zonal e meridional como os descritos por SERVAIN & ARNAULT (1995).

CASTRO (2007) teve como objetivo de seu trabalho a determinação e identificação dos padrões de escala que atuam no sistema oceano-atmosfera, e que causam maior variabilidade dentro da escala intrasazonal entre a cidade de São Paulo e o oceano Atlântico Sul adjacente. Para tanto, se empregou a técnica da Transformada em Ondeleta (TO), o filtro de Lanczos e o método da transformada ou do chamado Espectro Cruzado de Ondeleta (ECO). Mostrou que o método ECO indicou maior correlação cruzada no período em que foram observados extremos espectrais.

SCHNEIDER (2004) aplicou os métodos da Transformada de Fourier (TF) e Transformada de Ondeletras (TO) às séries temporais de Radiação de Onda Longa Emergente (ROLE) com o objetivo de detectar as frequências de oscilação atmosférica no período de inverno nas regiões Sul, Sudeste (SE) e Centro-Oeste do Brasil (COB), com ênfase na escala intrasazonal. Mostrou que a TF e TO na escala intrasazonal encontrados foram semelhantes e apresentaram padrões de variabilidade interanual e atividade na banda intrasazonal. (SCHNEIDER, 2004).

REBOITA (2004) aplicou a Transformada de Ondeletras em estudo sobre a determinação dos sistemas atmosféricos que causam maior variabilidade climática no extremo sul do Brasil, a dois conjuntos de dados observando que a maior variância de ondeleta em todas as variáveis atmosféricas esteve associada ao ciclo anual, com exceção da componente zonal e meridional da velocidade do vento e da precipitação. Ela concluiu que o ciclo anual é o responsável pela maior parte da variabilidade climática no extremo sul do Brasil juntamente com as massas de ar e sistemas frontais (REBOITA, 2004).

2.1 – Aspectos Climatológicos do Nordeste Brasileiro

Sabe-se que para estudar aspectos climatológicos de uma determinada região, é necessário ter em mente que esta é afetada tanto pelos aspectos climatológicos na escala global quanto na escala regional.

No presente trabalho concentramos nossos estudos na identificação e caracterização dos principais aspectos climatológicos na escala global, ressaltando, que, devido à peculiaridade do conjunto histórico utilizado, optou-se por enfatizar os padrões que afetam com mais frequência a região em questão (Estado do Ceará). Esses padrões são a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), Distúrbios Ondulatórios de Leste e as Frentes Frias.

Era de se esperar que, por sua posição geográfica ($1^{\circ} - 18^{\circ} \text{ S}$, $36^{\circ} - 47^{\circ} \text{ W}$), o NEB apresentasse uma distribuição pluviométrica semelhante à de regiões próxima ao Equador; Entretanto, a precipitação média anual sobre a região, a qual se encontra ao leste de uma grande floresta tropical, a Amazônica, é bem menor que a precipitação média equatorial (MOURA & SHUKLA, 1981).

O Estado do Ceará possui particularmente um clima equatoriano devido sua posição geográfica ($2^{\circ} - 8^{\circ} \text{ S}$, $37^{\circ} - 41^{\circ} \text{ W}$) e por causa de sua sazonalidade em relação à precipitação, faz com que o regime de chuva seja definido e concentrado em poucos meses do ano.

Um dos aspectos climatológicos desse período chuvoso se dá entre os meses de março a junho apresentando máxima precipitação durante os meses de março e abril coincidindo com a posição mais sul da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT).

Esta zona é descrita como sendo uma zona de baixa pressão formada sobre os oceanos equatoriais e é assim denominada por se tratar da faixa para onde os ventos alísios dos dois Hemisférios convergem, constituindo uma banda de grande convecção, com altos índices de precipitação e movimento ascendente (UVO, 1989, FERREIRA, 1996).

O movimento ascendente de ar, gerado pela convergência dos ventos alísios nos baixos níveis, é facilmente observado nas fotos de satélite pela área de nebulosidade convectiva que se forma na faixa equatorial.

No Estado do Ceará, a estação chuvosa vai de janeiro a junho com máximos de precipitação durante março e abril, meses nos quais a ZCIT atua de forma mais sistemática (STUDART, 2002). A figura 1 mostra uma imagem de satélite onde se observa de modo claro a influência da ZCIT na região NEB e em especial sobre o Estado do Ceará.

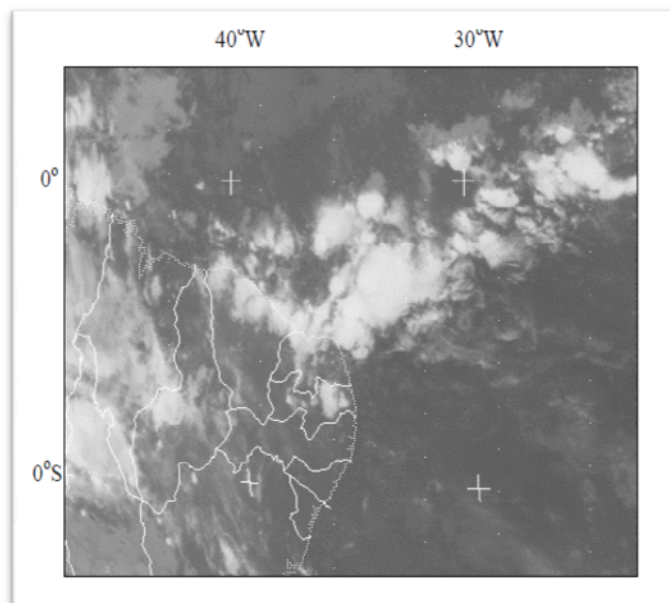


FIGURA 2.1 - Imagem do satélite METEOSAT 5, setorizada, no canal infravermelho, ilustrativa da ZCIT influenciando o setor norte do NEB em 15/03/94 às 18:00 TMG (Fonte: MELO, 1997).

Existe um consenso no sentido de afirmar que a ZCIT é realmente o principal componente climático no tocante ao regime de chuva no Estado do Ceará. O posicionamento ZCIT é de extrema importância na definição da qualidade da quadra chuvosa sobre todo o setor norte do NEB (MELO, 1997)

A influência da ZCIT é marcante principalmente em anos chuvosos, a exemplo de 1974 e 1994. Contudo, é fato que aspectos meteorológicos em escala global podem acentuar ou inibir o desempenho de sistemas principais como a ZCIT (MELO, 1997).

Entretanto, a parte Sul do Estado, que possui o regime de chuva um pouco diferenciado devido às frentes frias vindas do sul do país que ocorrem geralmente nos meses de dezembro e janeiro e que dependendo da intensidade dessas frentes frias, essa região do Estado é atingida com precipitações regulares.

A figura (Figura 2) abaixo mostra uma imagem de satélite no mês de janeiro de 2009 onde podemos perceber a aproximação da massa de ar fria em direção ao Nordeste, onde sua magnitude permite a chegada desse sistema ao sul do Estado do Ceará.

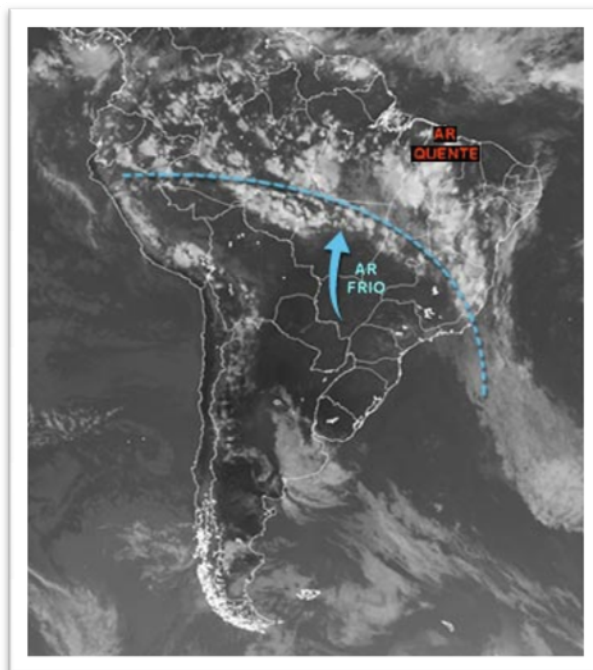


FIGURA 2.2 - Imagem de Satélite GOES-12, no canal Infravermelho, no dia 06 de janeiro de 2009, às 19h15min do horário de Brasília (Fonte: INMET, 2009).

Outro tipo de elemento climático que afeta o estado são os chamados Distúrbios Ondulatórios de Leste, também conhecidos como ondas de leste (*easterly waves*), são sistemas de grande escala que atuam sobre a costa norte e nordeste da América do Sul (ALVES, 2006).

A região leste do estado sofre um regime de chuva diferenciado, pois além da ZCIT e dependendo da intensidade de chuva, pode ser atingido pelas “Ondas de Leste” que se caracteriza como sendo uma massa de ar fria que vem do leste do Oceano Atlântico no período de junho a julho. Portanto, devido a esse regime peculiar de chuva.

Geralmente as chuvas atingem a parte leste da região NEB no período de junho a agosto, no entanto, dependendo de sua intensidade, pode atingir boa parte da região leste do Estado Ceará, como no ano de 2009, que choveu mais que a média esperada e meses além daqueles meses que é considerado o período chuvoso para o Estado.

A figura abaixo (Figura 2.3) mostra a previsão de precipitação feita em 01/07/2008 onde se percebe que, devido à intensidade, a parte Leste do Estado do Ceará é atingida com chuvas.



FIGURA 2.3 - Imagem de Satélite GOES-12, no canal Infravermelho, no dia 01 de julho de 2008, 24hs do horário de Brasília (Fonte: INMET, 2009).

Ainda destacando os componentes climáticos abordados sobre o Estado do Ceará, destacamos uma oscilação de grande escala que possui grande influência para a região de estudo, que é o El Niño/Oscilação Sul (ENOS).

PHILANDER (1990) relata que, do ponto de vista meteorológico, as variações interanuais na atmosfera tropical são causadas por mudanças na TSM (Temperatura da superfície do Mar). Do ponto de vista oceanográfico, as mudanças na TSM são causadas pela variabilidade atmosférica.

A duração do fenômeno El Niño pode variar entre 12 e 18 meses, enquanto que a ocorrência do fenômeno se dá em intervalos de dois anos até uma década. Também é válido ressaltar que há períodos em que os eventos de El Niño são mais intensos do que em outros (CASTRO, 2007).

KOUSKY e CAVALCANTI, em estudo sobre as características e a evolução dos eventos de Oscilação Sul (OS) associados às anomalias de precipitação mostraram que a natureza persistente destes eventos é devida ao forte acoplamento entre a atmosfera e o oceano. Os autores enfatizam que, embora a causa inicial da oscilação seja desconhecida, uma vez iniciada, a OS segue certa seqüência de eventos com efeitos bem definidos na precipitação sobre uma grande parte dos trópicos (KOUSKY e CAVALCANTI, 1984).

2.2 – Macrorregiões Homogêneas de Chuva no Estado do Ceará

O Estado do Ceará foi dividido em Macrorregiões Homogêneas de Chuva e, como o nome já propõe, é a divisão do estado em regiões nas quais a precipitação em média- anual é semelhante naqueles locais.

Para caracterizar os dados e a importância do conjunto histórico utilizado neste trabalho, definiram-se geograficamente as regiões pluviometricamente homogêneas através de estudos realizados pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUCEME) considerando os dados de chuvas (em mm) no período de 1964 a 1996.

XAVIER (2001) descreveu assim, as seguintes regiões no Estado do Ceará consideradas “pluviometricamente homogênea”:

1. LITORAL NORTE com postos entre Chaval e Acaraú, adentrando até a altura de Sobral;
2. LITORAL PECÉM com postos entre as localidades de Trairi e Pecém, mas adentrando até Pentecostes/Gen. Sampaio;
3. LITORAL DE FORTALEZA com postos entre Caucaia e Beberibe;
4. MACIÇO DE BATURITÉ e postos na sua circunvizinhança;
5. REGIÃO DA IBIAPABA com postos de Serra de Ibiapaba, porém, indo até Cariré, Hidrolândia e Poranga;
6. REGIÃO JAGUARIBANA desde o litoral do Aracati, porém se aprofundando como longa faixa até a altura de Icó;
7. REGIÃO DO CARIRI;
8. SERTÃO CENTRAL incluindo INHAMUNS.

A Figura 2.4 mostra o Estado do Ceará e sua divisão em função das regiões pluviometricamente homogêneas 1964-1996:

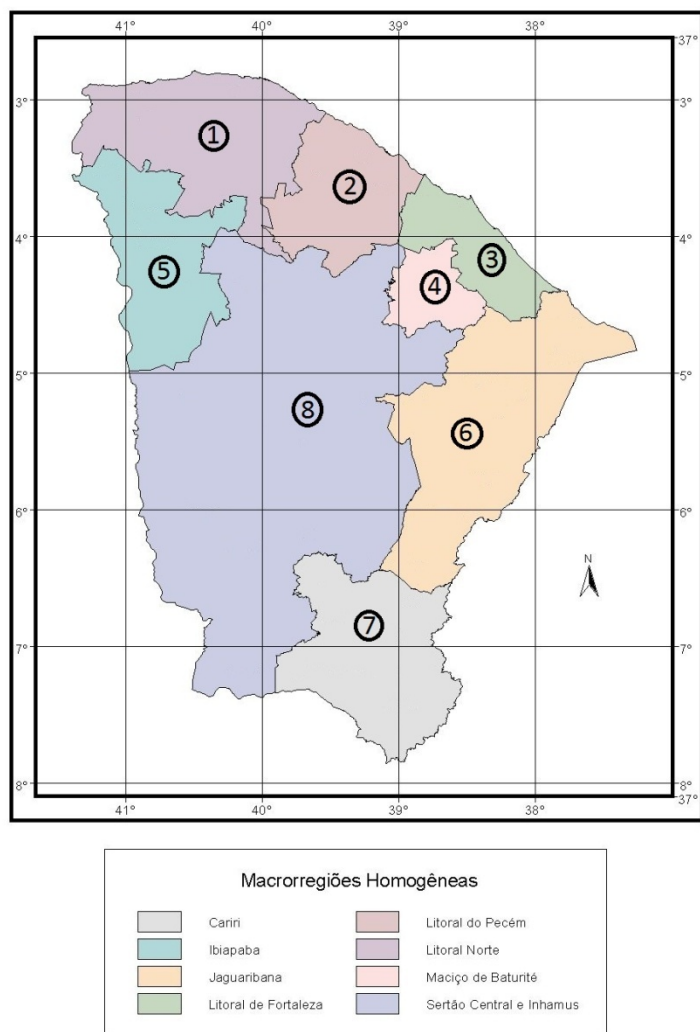


FIGURA 2.4 – Macrorregiões Homogêneas de Chuvas (Fonte: FUNCEME)

2.3 – Análise de Séries Temporais

Nesta seção abordaremos uma das principais ferramentas utilizadas para o estudo e a modelagem matemática de séries temporais.

O pioneiro em tais estudos foi LORENZ (1969) quando este investigou o comportamento irregular da circulação geral atmosférica utilizando um modelo que se baseia em três equações diferenciais ordinárias integradas numericamente com ou sem variações da forçante térmica externa, para representar aspectos da circulação de Hadley (LORENZ, 1984).

Neste caso, ele observou que com a inclusão do ciclo sazonal, podem ocorrer variações interanuais intensas, com alternâncias irregulares entre os verões ativos, onde as

correntes de vento de oeste zonal são submetidas a fortes oscilações, em oposição a verões inativos, quando as oscilações são menores (CASTRO, 2007).

Como muitos dos sistemas climáticos sobre o Estado do Ceará apresentam um caráter irregular é necessário o uso de um método de análise de séries temporais que seja eficiente e adequado na localização temporal das estruturas de influência global e regional.

Uma série temporal pode ser entendida como um conjunto de dados quantitativos adquiridos ao longo do tempo. O tempo pode ser considerado como escala de evolução de determinada variável, e em Meteorologia, temos exemplos de séries que mostram a evolução de muitos fenômenos climáticos e sua classificação, tais como: a temperatura diária do oceano, registro de marés, séries pluviométricas, etc.

Uma série temporal pode ser uma função x aleatória ou não-determinística de uma variável independente t . Na maioria das situações, a função $x(t)$ será uma função do tempo, mas em outras situações pode ser uma função de outro parâmetro físico, como por exemplo, do espaço.

Uma característica das séries temporais é que seu comportamento futuro não pode ser previsto exatamente, como seria o caso de uma função ‘determinística’ do tempo. Dentre suas características, as séries temporais podem ser consideradas como a realização de processos estocásticos (CARVALHO, 2001).

Uma vez que diferentes secções de uma série temporal se parecem uma com a outra apenas nas suas propriedades médias, é necessário descrever essas séries por leis de probabilidades ou modelos.

Assim, os valores possíveis das séries temporais a um dado tempo t são descritos por uma variável aleatória $x(t)$ e sua associada distribuição de probabilidades.

O valor observado $x(t)$ da série temporal no tempo t é então considerado como um dos infinitos valores nos quais a variável $x(t)$ pode ter no tempo t . Em outras palavras, o comportamento da série temporal para todos os tempos t pode ser descrito por um conjunto de variáveis aleatórias $\{X(t)\}$ onde t pode ter qualquer valor entre $-\infty$ a $+\infty$.

Assim, as propriedades estatísticas das séries são descritas por distribuições de probabilidade com qualquer conjunto de tempos t_1, t_2, \dots, t_N . O conjunto ordenado de variáveis aleatórias $\{X(t)\}$ em associação com sua distribuição de probabilidades são chamados de processos estocásticos (CARVALHO, 2001).

As suposições mais importantes feitas sobre uma série temporal são:

- a) O correspondente processo estocástico é *estacionário*;
- b) um processo estocástico estacionário pode ser adequadamente descrito pelos mais *baixos momentos* (ou momentos de baixa ordem) de suas distribuições de probabilidade. Esses momentos de baixa ordem incluem: *média, variância, covariância, a transformada de fourier da função de covariância e o espectro de potência*.

Assim, uma aproximação alternativa é supor que o processo estocástico pode ser adequadamente descrito por meio de parâmetros que podem ser estimados a partir dos dados.

2.4 – A análise de Fourier

Um dos métodos mais eficazes e conhecidos para análise de séries temporais é a Transformada de Fourier. Para melhor entendimento, esta seção aborda os conceitos matemáticos acerca deste método.

Uma das principais razões da ampla utilização de análise espectral, como ferramenta analítica, é devido ao fato de que o espectro fornece uma descrição bastante simples do efeito de uma transformação linear de um processo estacionário. (MORETTIN, 2006).

A análise de Fourier, ou *análise espectral* de uma série temporal consiste em expressar uma função $f(t)$, considerando os fenômenos investigados serem, do tipo periódico, como uma somatória de funções trigonométricas de senos e cossenos. Um dos princípios fundamentais na análise de Fourier é que um sinal periódico, de período $2L$, definido no intervalo fechado $[-L, L]$ possa ser representado por:

$$f(t) = \sum_{n=0}^{\infty} [a_n \cos(\hat{u}_n t) + b_n \text{sen}(\hat{u}_n t)] \quad (2.1)$$

Em que \hat{u}_n é o dado da série e os coeficientes a_n e b_n são chamados coeficientes de Fourier, cujos valores são conseqüentes da formação de uma base ortogonal formada pelas funções seno e cosseno dadas por:

$$a_0 = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(t) dt$$

$$a_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(t) \cos(\omega_n t) dt$$

(2.2)

$$b_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(t) \text{sen}(\omega_n t) dt$$

Se $f(t)$ tem período $T = 2L$ então ω_n é a frequência angular, para cada n dada por:
 $\omega_n = (2\pi/T)n = (\pi/L)n$ (em radianos por unidade de tempo), e o período relacionado a frequência angular é $T = (2\pi/\omega_n)n$ (em unidade de tempo). É comum escrever a equação 2.1 na forma:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos\left(\frac{\omega_n}{L} t\right) + b_n \text{sen}\left(\frac{\omega_n}{L} t\right) \right] \quad (2.3)$$

Dizemos então que a equação (2.3) é a representação espectral de $f(t)$. O objetivo desta análise é obter a amplitude em função da frequência para cada senóide que compõe o sinal. Pela fórmula de Euler, podemos escrever a série de Fourier na sua forma complexa:

$$f(t) = \sum_{h=-\infty}^{\infty} c_n e^{i\omega_n t / L} \quad (2.4)$$

em que os coeficientes c_n são obtidos por:

$$c_n = \frac{1}{2L} \int_{-L}^L f(t) e^{-i\omega_n t / L} dt, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (2.5)$$

ou

$$\frac{a_n - b_n}{2}, \quad \text{se } n \geq 1$$

$$\frac{a_0}{2}, \text{ se } n = 0 \quad (2.6)$$

$$\frac{a_{|n|} - ib_{|n|}}{2}, \text{ se } n \leq -1$$

A Transformada de Fourier (TF) é um dos métodos mais utilizados em análise de séries temporais. A partir da série de Fourier é possível desenvolver sua transformada. Com as equações 2.4 e 2.5 e fazendo $h = \pi/L$ e $\omega_n = nh = n\pi/L$, $n=0, 1, 2, \dots$, então:

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{i\omega_n t} \quad (2.7)$$

$$c_n = \frac{h}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{h}}^{\frac{\pi}{h}} f(t) e^{-i\omega_n t} dt \quad (2.8)$$

Definindo-se

$$F(\omega_n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-L}^L f(t) e^{-i\omega_n t} dt \quad (2.9)$$

Com $(L, -L) = (-\pi/h, \pi/h)$, temos que:

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} h F(\omega_n) e^{i\omega_n t} \quad (2.10)$$

fazendo $L \rightarrow \infty$ e $h \rightarrow 0$, considerando que a equação (2.10) é uma integral de Riemann definida pela integral $F(\omega) e^{i\omega t}$, obtemos:

$$\mathfrak{F}\{f(t)\} = F(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \quad (2.11)$$

$$f(t) = \mathfrak{F}^{-1}\{F(\omega)\} = \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega)e^{i\omega t} dt \quad (2.12)$$

assumindo o t como o tempo e ω como a frequência angular, as equações (2.11) e (2.12) definem então a transformada de Fourier e sua inversa, respectivamente. As constantes 1 e $1/2\pi$ que precedem as integrais (2.11) e (2.12) podem ser substituídas por quaisquer constantes, desde que o produto seja igual a $1/2\pi$.

Séries temporais nem sempre correspondem a funções finitas ou contínuas, mas remetem necessariamente a registros discretos de determinados fenômenos, representados por $f(t)$, com $f_0, f_1, f_2, \dots, f_{N-1}$, com um número N de observações amostrados em intervalos constantes de tempo Δt ou por um período T . Considerando $\Delta t = 1$, o conjunto de discreto de frequências de Fourier $\omega_n = 2\pi n/N\Delta t$, $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$, o período $T_n = N\Delta t/n$ e definindo a transformada discreta de Fourier como sendo:

$$F_n = \frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-1} f_t e^{-i\omega_n t} \quad (2.13)$$

e a transformada discreta inversa de Fourier como:

$$f_t = \sum_{n=0}^{N-1} F_n e^{i\omega_n t} \quad (2.14)$$

A transformada discreta de Fourier tem sido amplamente utilizada na estimação de espectros dos processos estacionários. O cálculo da transformada inversa de Fourier envolve $O(N^2)$ operações complexas. Entretanto, o uso do algoritmo da chamada transformada rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform*), conhecida como FFT, a TF pode ser calculada usando $O(N \log_2(N))$ operações (CHIERICE, 2003).

A TF possui várias funções que selecionam determinadas frequências em um dado intervalo de tempo, denominadas “filtros”. A denominação “filtro” vem da engenharia de comunicações significando um mecanismo que deixa passar componentes com frequências em uma dada faixa de frequência. (MORETTIN, 2006)

No estudo de séries temporais, uma das principais funções de filtragem de dados é o filtro passa-banda, pois este seleciona funções associadas a um intervalo espectral em todo o

período da série, de tal forma a considerá-la como “média” em cada frequência (VITORINO, 2002).

2.5 – A Análise em Ondeleta

A palavra ondeleta derivada do vocábulo francês “*ondelette*”, que denota o diminutivo da palavra onda, ou seja, “ondinha” ou “ondícula”, surgiu em meados dos anos 80, a partir dos estudos de um grupo de pesquisadores franceses. A idéia na análise ondeleta consiste em aproximar uma função por uma combinação linear de funções básicas (ondeletas), obtendo assim uma boa representação da função original tanto no domínio das frequências como no domínio temporal. A aplicação de ondeletas não exige a estacionariedade das séries em estudo, sendo apropriada para a análise de eventos irregularmente distribuídos. (CASTRO, 2007)

A análise de ondeleta é a decomposição de um sinal por meio de escalas (dilatação e compressão) e translação de uma dada ondeleta original (ondeleta mãe) (CASTRO, 2007). Para um significado mais amplo do conceito de escala, vejamos o exemplo de uma função senóide, $\psi(t) = \sin(\omega t)$ a qual introduziremos um fator de escala denotado por $a = 1/\omega$, com $\omega = 1, 2, 3, \dots, \infty$. Veremos então a compressão da senóide na figura 2.3:

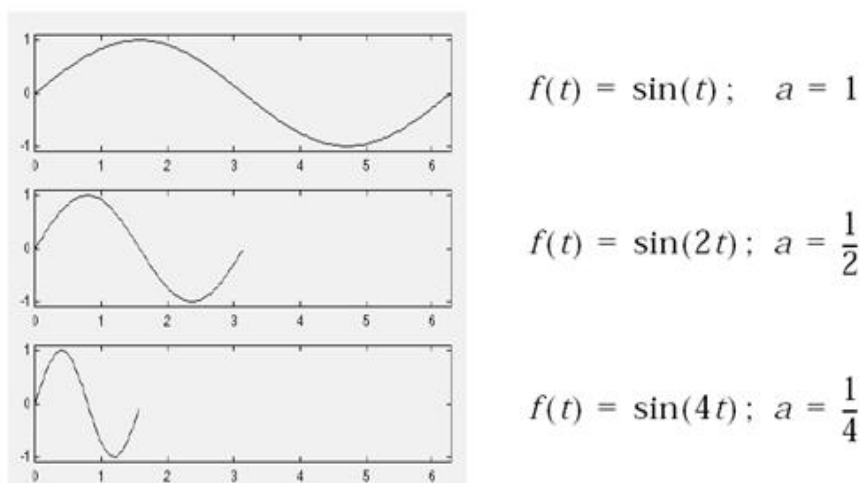


Fig.2.5 – Compressão de senóides. (wavelet Toolbox – Misiti, 1996).

Note que à medida que o fator de escala diminui, a senóide fica cada vez mais comprida. O fator de escala aplica-se de forma análoga para as ondeletas. Fatores de escala menores fazem a “compressão” de ondeletas e fatores de escala maiores fazem a “dilatação” de ondeletas. Figura 2.4:

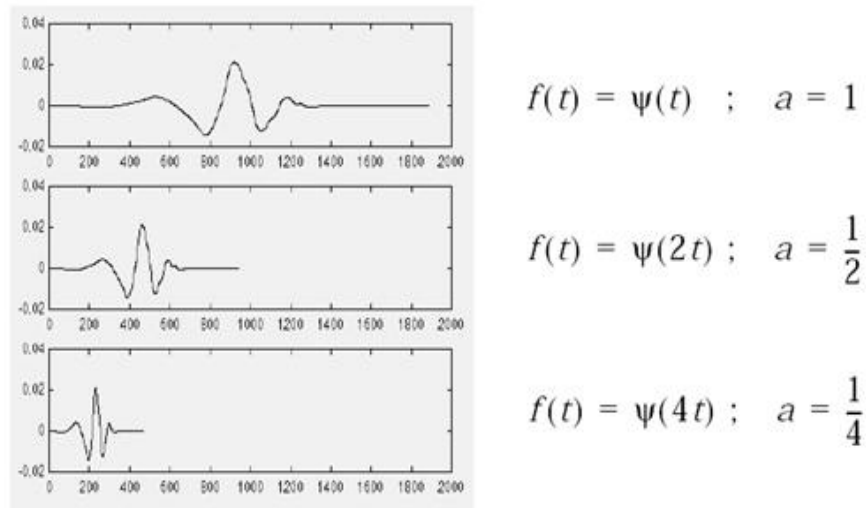


Fig.2.6 – Compressão de ondeletas. (wavelet Toolbox – Misiti, 1996).

quanto à variação do parâmetro a que corresponde à informação de escala, temos:

- i) para $a > 1$, tem o efeito de dilatação da função ondeleta-mãe;
- ii) para $a < 1$, tem o efeito de contração da função ondeleta-mãe;

Esta propriedade torna possível analisar os aspectos globais e locais de séries temporais. A translação de uma ondeleta, representada pelo parâmetro b , significa atrasar (ou adiantar) o seu início. Deslocar uma função $\psi(t)$ em b é representá-la por $\psi(t - b)$ conforme a figura 2.5:



Fig.2.7 – Translação de ondeleta deslocada. (wavelet Toolbox – Misiti, 1996).

A medida que b varia, a função é analisada localmente em torno de b .

As funções ondeletas apresentam certas propriedades dentre as quais podemos citar:

- A expansão ondeleta gera uma localização tempo-frequência do sinal;
- O cálculo dos coeficientes do sinal pode ser feito eficazmente.

Pode-se mostrar que muitas transformações de ondeletas (o conjunto de coeficientes de expansão) podem ser calculadas com $O(N)$ operações. Isto significa que o número de multiplicações e adições aumentam linearmente com o número de elementos do sinal analisado. As transformações de ondeletas mais gerais requerem $O(N \log(N))$ operações, o mesmo que para a FFT (*Fast Fourier Transform*);

A expansão de ondeletas permite uma descrição local mais precisa e uma melhor separação das características do sinal;

Existem inúmeras famílias de ondeletas e isso facilita a sua utilização em vários tipos de sinais (CHIERICE, 2003).

Matematicamente, a transformada de ondeleta contínua é definida em termos de uma integral de convolução entre o sinal analisado $f(t)$ e uma ondeleta conhecida como “ondeleta-mãe”, ondeleta-geratriz ou ainda ondeleta analisadora, expressa por:

$$C(a,b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\psi_{a,b}(t)dt \quad (2.15)$$

em que os parâmetros a e b variam continuamente em \mathbb{R} , com $a \neq 0$, e

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad a \in \mathbb{R}^+ \text{ e } b \in \mathbb{R} \quad (2.16)$$

Sendo as funções $\psi_{a,b}$ chamadas ondeletas filhas e são geradas a partir de dilatações e translações da ondeleta-mãe $\psi(t)$. No caso da transformada contínua as ondeletas-mãe mais conhecidas são as de Morlet e Chapéu Mexicano.

Na equação (2.16), o termo em denominador \sqrt{a} corresponde a um fator de normalização da energia de cada ondeleta de forma a manter a mesma energia da ondeleta-mãe. Nessa equação os parâmetros a e b , correspondem, respectivamente, as informações de escala e translação. A equação (2.16) pode também ser escrita como o produto interno de $f(t)$ com uma função ondeleta $\psi_{a,b}(t)$, isto é, $C(a,b) = \langle f, \psi_{a,b} \rangle$. Esta equação, de fato está

decompondo f em uma superposição de ondeletas $\psi_{a,b}(t)$. Desta forma, os parâmetros a e b , associam aos coeficientes $C(a, b)$, valores de frequência e localização no tempo, em cada intervalo Δt do sinal analisado. Uma função ondeleta ψ apresenta as seguintes propriedades:

P1) Para ser dita ondeleta

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (2.17)$$

Isso garante que a função ondeleta tem uma forma do tipo onda – condição de admissibilidade;

P2) A função ondeleta deve ter energia unitária, isto é,

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt = 1 \quad (2.18)$$

isso garante o suporte compacto, ou um decaimento rápido de amplitude, garantindo a localização espacial. Para se obter a transformada ondeleta de um sinal deve-se proceder como se segue:

Passo 1: escolher uma ondeleta-mãe e compará-la com uma seção no começo do sinal original;

Passo 2: calcular o coeficiente ondeleta, a partir da transformada ondeleta e quanto menor a amplitude desse coeficiente melhor será a aproximação entre ondeleta e o sinal na seção tomada;

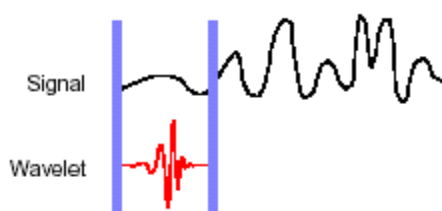


Fig.2.8 – Análise ondeleta em uma seção do sinal. (wavelet Toolbox – Misiti, 1996).

Passo 3: tomar a próxima seção do sinal e novamente repetir os passos 1 e 2 até cobrir, de seção em seção, todo o sinal;

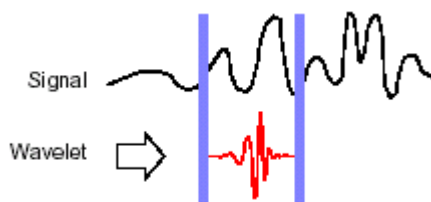


Fig.2.9 – Análise ondeleta em uma nova seção do sinal. (wavelet Toolbox – Misiti, 1996).

Passo 4: ajustar uma nova escala para a ondeleta (dilatar ou comprimir) e repetir os passos de 1 a 3;

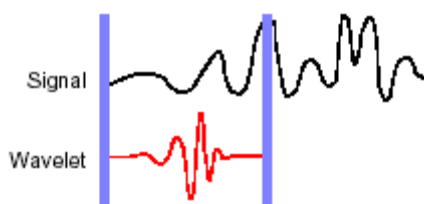


Fig.2.10 – Análise ondeleta com uma ondeleta de nova escala. (wavelet Toolbox – Misiti, 1996).

Passo 5: repetir os passos de 1 a 4 para todas as escalas da ondeleta (quantas vezes se mostrarem necessárias).

Ao término de todos os passos descritos acima teremos produzido coeficientes ondeleta em diferentes escalas e seções do sinal. Os coeficientes ondeletas das escalas maiores estão associados a ondeletas mais dilatadas e, escalas menores, a ondeletas mais comprimidas. Pode-se observar ainda que, quanto mais dilatada for a ondeleta, maior será a seção do sinal com o qual ela estará sendo comparada e, deste modo, as características mais visíveis estão sendo medidas pelos coeficientes ondeletas. Assim, existe uma correspondência entre as escalas ondeleta e a frequência revelada pela análise ondeleta,(CASTRO,2007), figura 2.9.

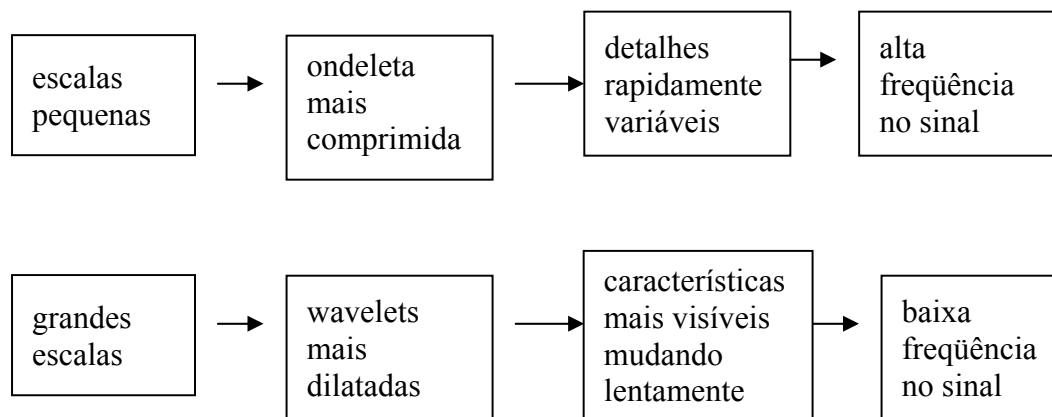


Fig.2.11 – Correspondência entre escalas e frequências na análise ondeleta. (wavelet Toolbox – Misiti, 1996).

2.6 - Modelo de Box e Jenkins

Para um melhor entendimento do modelo Box e Jenkins, conhecido como modelo ARIMA se faz necessário um conhecimento prévio sobre Modelos Autoregressivo (AR) e de Média Móvel (MA).

A especificação de um modelo Autoregressivo (AR) é dada pela equação (2.19) (WHEELWRIGTH,1985).

$$x_t = \phi_1 x_{t-1} + \phi_2 x_{t-2} + \dots + \phi_p x_{t-p} + e_t \quad (2.19)$$

onde x_t corresponde à observação da série temporal no tempo t ;

ϕ_p corresponde ao parâmetro do modelo AR de ordem p e

e_t representa o erro de eventos aleatórios que não podem ser explicados pelo modelo.

Caso as observações da série temporal possam ser representadas pela equação (2.19), a ordem do modelo puder ser determinada e os parâmetros estimados, é possível prever o valor futuro da série em análise (MUELLER, 1996).

Um modelo de Médias Móveis (MA) fica definido conforme equação (2.20) (WHEELWRIGTH, 1985).

$$x_t = e_t - \theta_1 e_{t-1} - \theta_2 e_{t-2} - \dots - \theta_q e_{t-q} \quad (2.20)$$

onde e_t representa o erro de eventos aleatórios que não podem ser explicados pelo modelo e θ_q corresponde ao parâmetro do modelo MA de ordem q .

A equação (2.20) é similar à equação (2.19), exceto pelo fato de que o valor previsto para a observação x_t depende dos valores dos erros observados em cada período passado, ao invés das observações propriamente ditas. Wheelwright e Makridakis (WHEELWRIGTH,1985) especificam o modelo misto Autoregressivo e de Médias Móveis (ARMA) através da equação (3.13), como sendo a combinação dos modelos AR e MA. (MUELLER, 1996).

$$x_t = \phi_1 x_{t-1} + \phi_2 x_{t-2} + \dots + \phi_p x_{t-p} + e_t - \theta_1 e_{t-1} - \theta_2 e_{t-2} - \dots - \theta_q e_{t-q} \quad (2.21)$$

Analisando a equação (2.21) é possível verificar que os modelos ARMA relacionam os valores futuros com as observações passadas, assim como também com os erros passados apurados entre os valores reais e os previstos.

O método de Box e Jenkins consiste na busca de um modelo ARIMA (AutoRegressive Integrate Moving Average) que represente o processo estocástico gerador da série temporal, a partir de um modelo ARMA aplicável na descrição de séries temporais estacionárias, estendendo esse conceito para séries temporais não-estacionárias (NELSON,1973).

Genericamente, um processo ARIMA(p,d,q) pode ser representado pela equação (2.22).

$$w_t = \phi_1 w_{t-1} + \dots + \phi_p w_{t-p} + e_t - \theta_1 e_{t-1} - \dots - \theta_q e_{t-q} \quad (2.22)$$

sendo $w_t = x_t - x_{t-d}$, onde ϕ_p e θ_q são os parâmetros dos processos Autoregressivo e de Média Móvel de ordem p e q (ARMA(p,q)); e_t corresponde ao erro de eventos aleatórios que não podem ser explicados pelo modelo e d equivale ao grau de homogeneidade não-estacionária.

De acordo com (BOX,1976), a estratégia para construção de um modelo ARIMA envolve uma abordagem iterativa que pode ser resumida conforme ilustra a figura 3.2 (MUELLER, 1996).

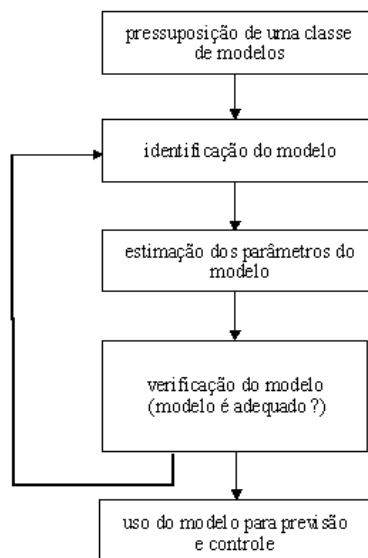


Figura 2.12- Estágios da construção de um modelo ARIMA.Fonte : [BOX1976]

O objetivo da identificação é determinar os valores de p , d e q do modelo $ARIMA(p,d,q)$. Inicialmente, a série temporal é diferenciada para se obter uma série estacionária. Com isso, o processo fica reduzido a um modelo $ARMA(p,q)$. Em seguida, a ordem do processo ARMA é identificada pela análise dos coeficientes de autocorrelação e autocorrelação parcial (MUELLER, 1996).

Ainda nesta etapa são efetuadas estimativas preliminares dos parâmetros do modelo identificado. Após a identificação do modelo que seja uma representação adequada do mecanismo gerador da série, a estimação dos parâmetros desse modelo é efetuada. (JUDGE,1988) coloca que os parâmetros do processo AR são estimados através de métodos de regressão; caso o processo MA esteja envolvido, a estimação dos parâmetros deste modelo é obtida pela aplicação de algum algoritmo de otimização não-linear. (MULLER,1996).

Estimado o modelo, a *verificação* de sua habilidade em representar os fenômenos observáveis da série temporal é confirmada pela análise dos erros do modelo proposto. Caso a inadequação fique evidenciada, o ciclo de identificação, estimação e verificação é novamente aplicado, até que a representação apropriada seja encontrada.

Após a validação do modelo, a *previsão* dos valores futuros da série temporal modelada pode, enfim, ser obtida. (MUELLER, 1996).

CAPÍTULO 3

3 - METODOLOGIA

3.1 - *Dados utilizados*

Através dos estudos anteriores sobre o ciclo hidrológico do Estado do Ceará percebe-se claramente que há uma diferenciação no regime de chuva do estado com relação às demais regiões do NEB e entre partes de sua própria região.

Para melhor entendimento do seu regime de chuva o estado foi dividido em Macrorregiões Homogêneas, para isso, em função da necessidade de uma análise mais profunda em termos da complexidade hidro-meteorológica da região em questão, utiliza-se somente um posto como referência, mesmo que os dados contidos na série histórica tenham uma boa correlação com os demais postos de outras Macrorregiões do Estado do Ceará (GIRARDI, 2001).

Para o estudo da caracterização do regime de chuva no Estado do Ceará os dados pluviométricos dos totais anuais dos postos para este trabalho foram obtidos através do aplicativo HIDROWEB disponível no site da Agência Nacional de Águas (ANA - www.ana.gov.br).

A Tabela 3.1 mostra os postos escolhidos, o tamanho da série histórica e sua respectiva localidade na Macrorregião do Estado.

Tabela 3.1: A localização dos postos das macrorregiões estudados.

Posto	Localidade	Período	Macrorregião Homogênea
Guaraciaba do Norte	Guaraciaba do Norte	1912 – 2007	Região da Ibiapaba
Caucaia	Caucaia	1912 – 2008	Litoral Fortaleza
Crato	Crato	1912 – 2008	Região do Cariri
Jaguaruana	Jaguaruana	1912 – 2007	Região Jaguaribana
Campos Sales	Campos Sales	1912 – 2008	Sertão Central
Senador Pompeu	Senador Pompeu	1911 – 2008	Sertão Central
Acarape	Acarape	1912 – 2008	Maciço de Baturité

Em função dos postos possuírem período comum, no caso do posto de Senador Pompeu, optou-se por retirar os dados de 1911 e 2008, com relação aos postos de Caucaia,

Crato, Campos Sales e Acarape o dado referente ao ano de 2008 foi retido para que todos os postos tivessem a mesma quantidade de dados.

Portanto, cada posto possui uma série temporal com total anual contabilizando desta forma 96 anos de dados para cada posto escolhido. A escolha destes postos foi feita devido a sua respectiva série histórica conter um maior número de dados consistido pela ANA dentro dos demais postos contido em sua Macrorregião e assim poder adquirir os dados de chuvas totais anuais para estudos.

Em relação ao Sertão Central foram obtidas duas séries históricas dessa Macrorregião devida sua grande extensão territorial, cerca de 70% do Estado do Ceará, e assim fazer uma análise melhor dessa macrorregião.

Para as macrorregiões do Litoral Norte e Litoral Pecém não foram encontrados séries históricas com suficiente número de dados que pudesse validar e consolidar os estudos de construção de cenários nesses locais com maior exatidão. Por isso, essas macrorregiões não foram incluídas neste estudo.

Em alguns dos postos escolhidos, houve algum ano em que não foi registrado dado algum e os postos vizinhos ao selecionado também não possuía tal registro, portanto, escolheu-se a média da série histórica do total anual como dado substituinte. Assim obteve-se uma série completa e que não se altera de forma brusca os resultados. Vale ressaltar que foi apenas um ano não registrado no posto de Caucaia, Guaraciaba do Norte, Senador Pompeu e Acarape, sendo os dados estavam completos para os demais postos.

O mapa a seguir, obtido através da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUCEME), ilustra as Macrorregiões e a localização geográfica dos postos em questão.

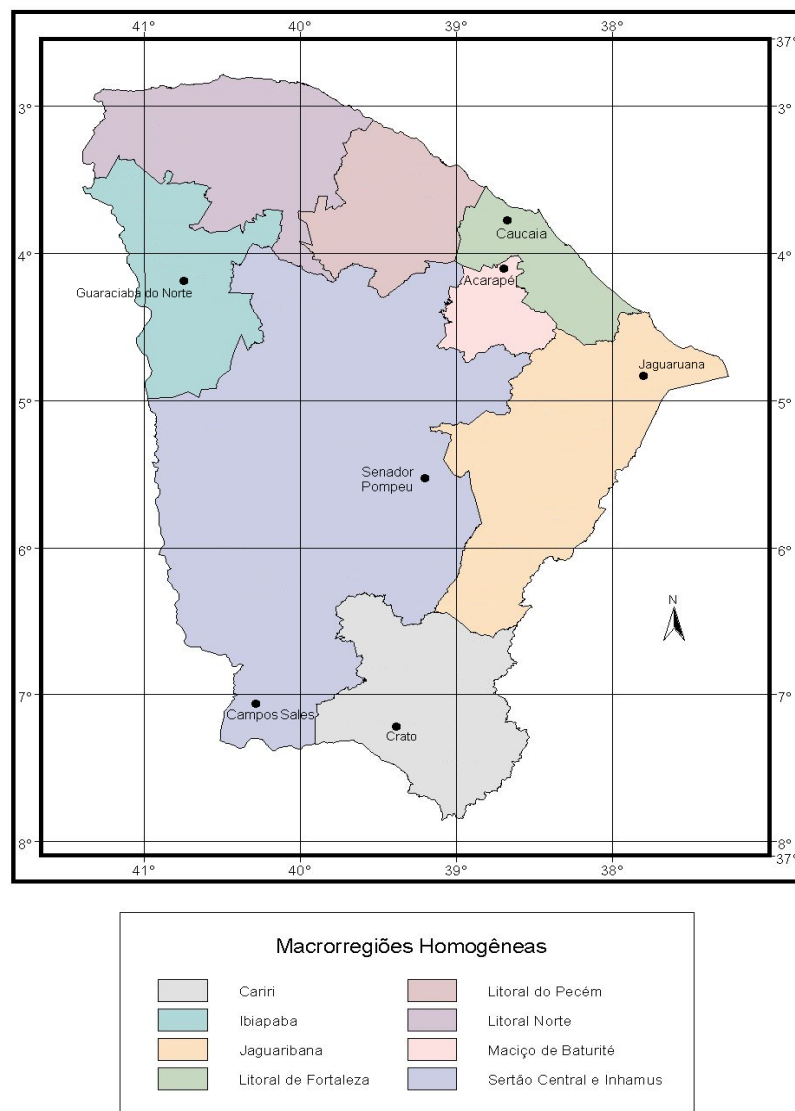


FIGURA 3.1 – As macrorregiões e sua localização geográfica dos postos (Fonte: Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos – FUCEME).

De acordo com GIRARDI (2001), em uma primeira análise dos dados “brutos”, é difícil verificar com precisão se existe alguma tendência que possa ser usada para fazer uma extrapolação dos dados, com a finalidade de se fazer previsões do nível de chuvas em cada região.

No entanto, para a observação dos padrões presentes nos regimes, foi utilizada uma ferramenta de análise estocástica que permite uma transformação da função no domínio do tempo para domínio da frequência.

Enfim, a proposta deste trabalho é fazer uma verificação dos padrões obtidos através da determinação da evolução temporal da precipitação em cada Macrorregião Homogênea do Estado do Ceará. Em seguida, propõe-se uma correlação entre a frequência de eventos em

escala global e os valores expressos em função das filtragens das séries temporais de dados, bem como seleciona-se os períodos críticos em que as mesmas ocorrem.

3.2 - Aplicação de Análise de Fourier em Séries Pluviométrica

Neste trabalho, a periodicidade dos eventos de chuva contidos nos dados históricos pluviométricos dos postos foi obtida com auxílio da ferramenta computacional MATLAB versão 2006. A ferramenta permite a obtenção dos períodos de cada posto observado.

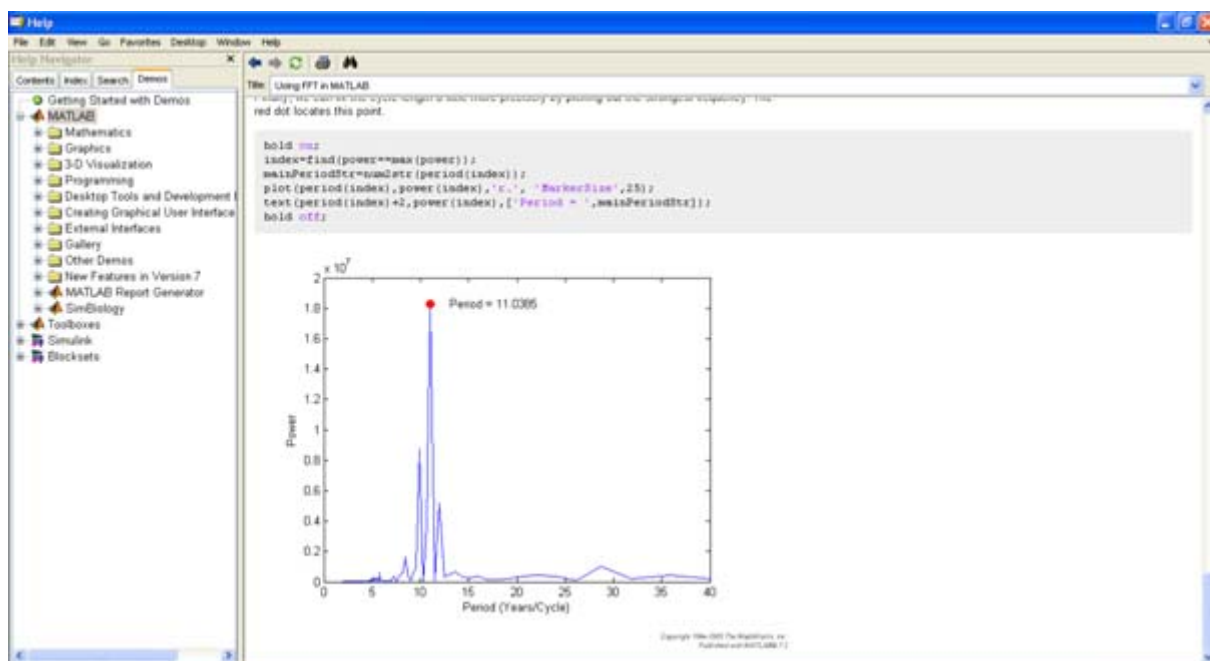


FIGURA 3.2 – programa MATLAB versão 2006

A frequência observada dos dados históricos pluviométricos dos postos foi obtida com auxílio de uma ferramenta computacional cujo código é denominado “Origin” (VERSÃO 6).

A ferramenta computacional aplica sobre os dados a FFT gerando a curva phi (ϕ) que pode ser interpretado em relação à frequência (Figura 3.2 e 3.3).

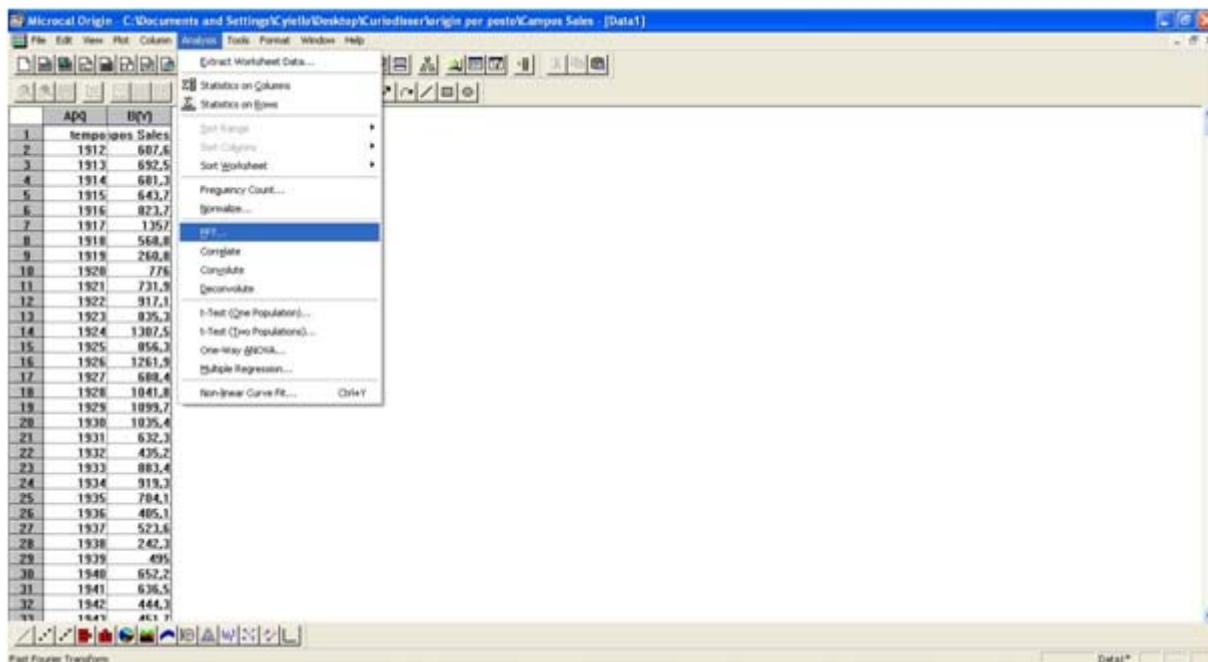


FIGURA 3.3 – programa ORIGIN versão 6.0

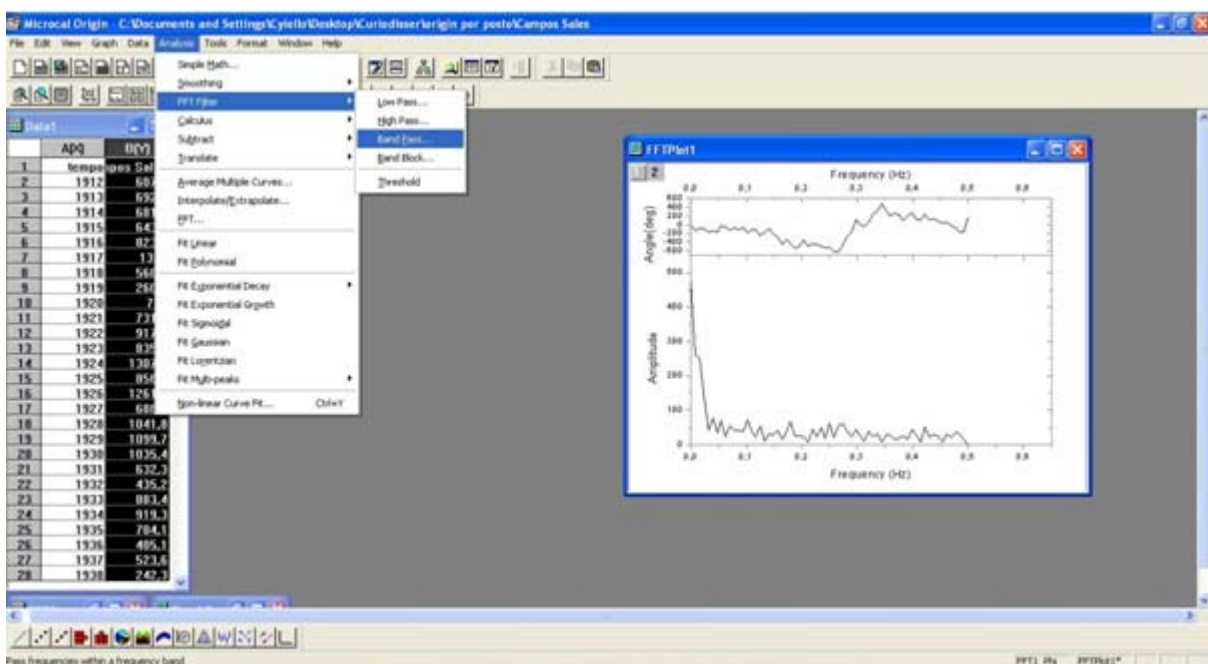


FIGURA 3.4 – Programa ORIGIN versão 6.0

Dentro do programa há a ferramentas auxiliares que ajuda na análise da FFT chamada de filtros, no qual, possibilita averiguar as faixas de frequências mais significativas para o estudo aqui realizado. O filtro passa banda é o mais indicado para estudos em relação à precipitação.

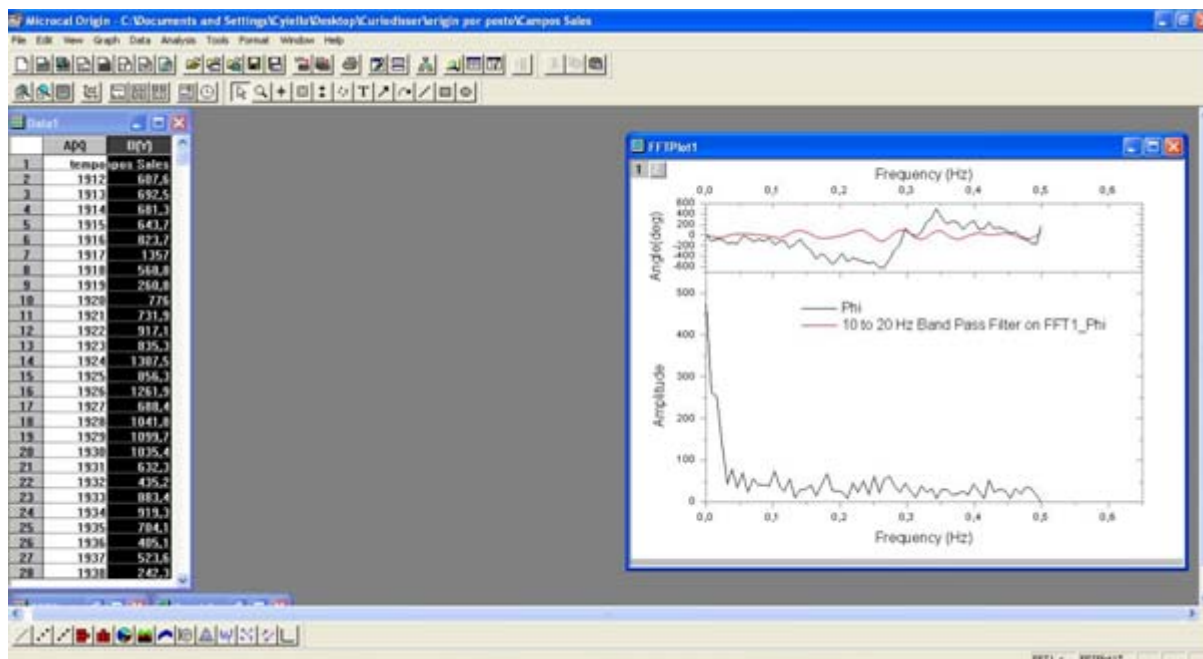


FIGURA 3.4 – Programa ORIGIN versão 6.0

A curva filtrada pode ser posto em ordem de tempo possibilitando a realização de um cenário em relação aos dados estudados.

GIRARDI (2001) conceitua a análise de Fourier como um bom exemplo de uso para estudos de possíveis periodicidades em séries pluviométricas. O autor aplicou esta ferramenta e verificou diversos ciclos nos dados pluviométricos para a cidade de Fortaleza, e com isso, gerou curvas de tendência, verificando desta forma uma possível tendência nos nível de chuva para o Nordeste do Brasil.

O mesmo autor cita que a amplitude do espectro de potência está associada à amplitude de cada uma das parcelas que compõe a série de Fourier, descrevem um fenômeno periódico, mostrando que realmente esta ferramenta tem uma grande importância nos estudos de frequência e na determinação de possíveis periodicidades nos regimes de chuvas.

CAPÍTULO 4

4 - RESULTADOS

Os resultados obtidos através do recurso computacional “MatLab” utilizado para obtenção dos períodos de maior potência dos postos selecionados e “Origin 6”, um software no qual foram feitos os cálculos FFT e obteve-se a função “phi (fi)”, bem como os valores de frequência das precipitações para cada posto analisado. A partir dos totais anuais da série histórica, medidos no período entre 1912 a 2007 e totalizando 96 anos de dados, seguem abaixo a caracterização da evolução temporal da precipitação para cada posto de cada Macrorregião Homogênea.

4.1 – ANÁLISE DE FOURIER PARA AS REGIÕES HOMOGÊNEAS

Com o uso da ferramenta computacional MatLab foram obtidas os períodos de maior potência para os postos observados. Os períodos observados variam entre 3,5185 anos (para os postos de Caucaia, Acarapé), 4,3182 anos (para o posto de Guaraciaba do Norte) e 5,5882 anos (para os postos de Senador Pompeu e Jaguaruana). Exceções foram o posto do Crato, que teve um período de maior potência em 13,5714 anos, e o posto de Campos Sales que teve seu período em torno de 47,5 anos.

Baseado nesses períodos a variação da filtragem passa banda da FFT foi dada em três níveis: 3-6 anos, 7-10 anos e 11-14 anos.

4.1.1 - Região da Ibiapaba - Posto de Guaraciaba do Norte

O posto Guaraciaba do Norte leva o nome da cidade onde está localizada. Seu código nacional de localização é 00440023 com um código adicional 2788353 pertencente à Sub-bacia do Rio Acaraú (número 35) tendo como a FUCEME sua responsável e operadora. Sua posição geográfica é latitude -4:11:0 s com longitude -40:45:0 w e tendo uma altitude de 380 metros em relação ao nível do mar. O histórico do índice pluviométrico total anual do posto Guaraciaba do Norte é mostrado na Figura 4.1:

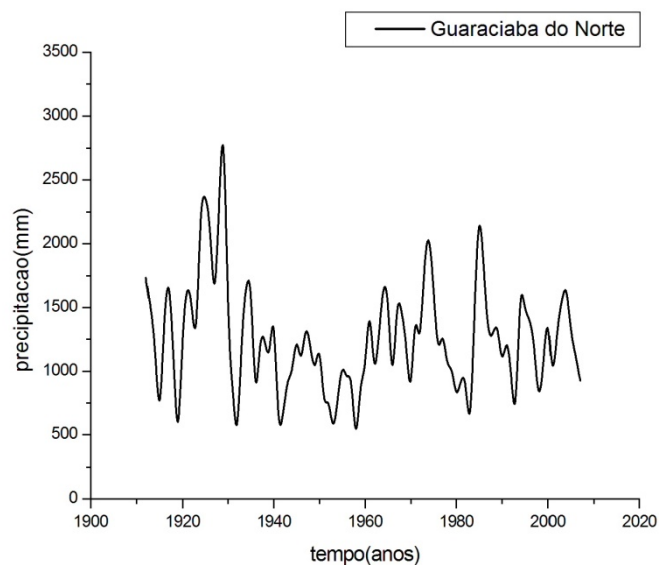


FIGURA 4.1 – Série de precipitação total anual para o posto de Guaraciaba do Norte (1912 – 2007)

A análise de Fourier foi aplicada aos dados da série temporal, permitindo uma transformação da função no domínio do tempo para o domínio da frequência, onde podemos verificar uma possível existência de períodos dominantes para os seguintes anos. A Figura 4.2 mostra o resultado:

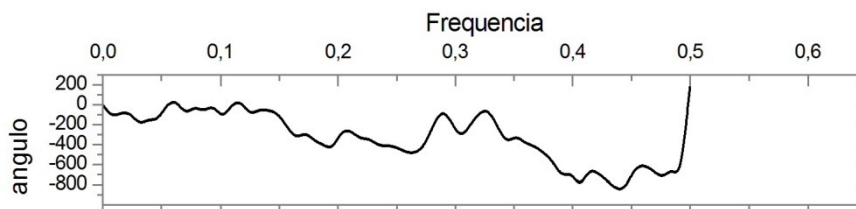


FIGURA 4.2 – Espectro da FFT para a série temporal dos totais anuais, região do posto de Guaraciaba do Norte.

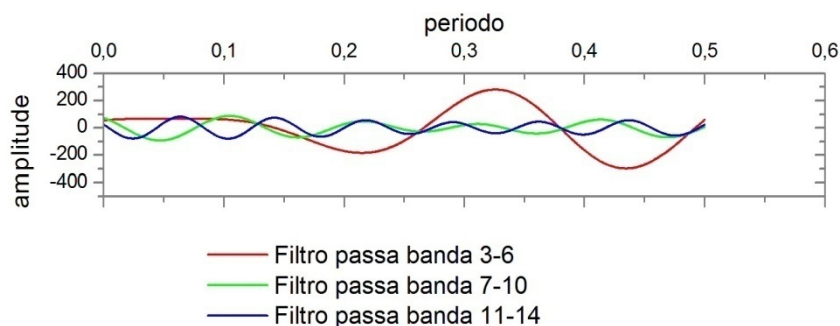


FIGURA 4.3 – Filtro passa banda para a série temporal do posto de Guaraciaba do Norte.

O filtro passa banda 3-6 não apresenta indícios de modo de variabilidade bem definidos, porém apresenta pouca variação ao longo do período com grande amplitude. Com relação ao filtro passa banda 7-10 mostra possíveis dois modos de variabilidade sendo de períodos curtos de baixas amplitudes e com grandes amplitudes. Para o filtro passa banda apresenta dois modos de variabilidade bem parecidos com grandes variações, no entanto, apresentando período de tamanho distinto.

4.1.2 – Região Litoral de Fortaleza - Posto de Caucaia

O posto Caucaia tem sua posição geográfica de latitude $-3^{\circ}45'0''$ e longitude $-38^{\circ}41'0''$ com altitude de 32 metros acima do nível do mar pertencente a sub-bacia do rio Acaraú (número 35). Seu código como referência nacional é 00338009 tendo um código adicional 2872473 tendo como responsável e operadora a FUNCEME. O histórico do índice pluviométrico total anual do posto Caucaia é mostrado na Figura 4.4:

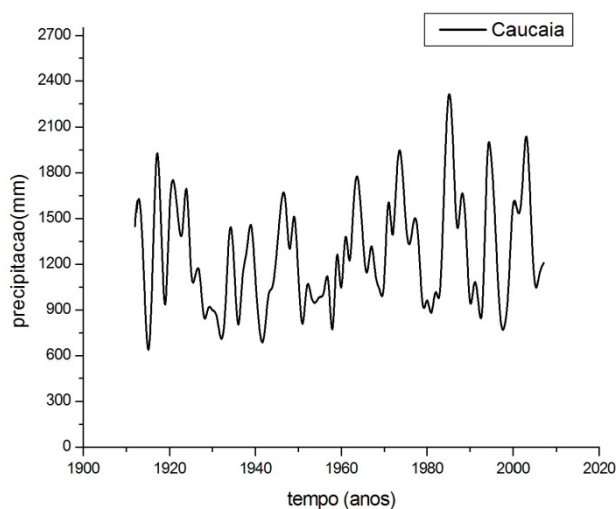


FIGURA 4.4 – Série de precipitação total anual para o posto de Caucaia (1912 – 2007).

A análise de Fourier foi aplicada aos dados da série temporal, permitindo uma transformação da função no domínio do tempo para o domínio da frequência, onde podemos verificar uma possível existência de períodos dominantes para os seguintes anos. A Figura 4.5 mostra o resultado:

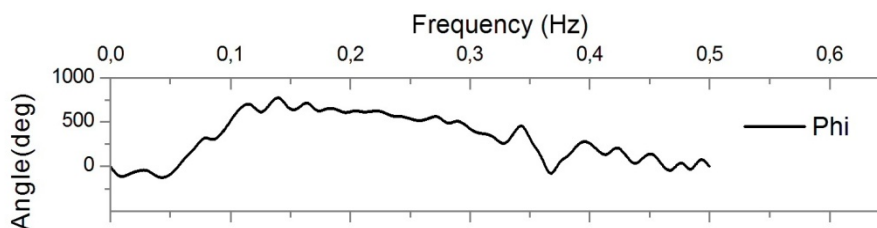


FIGURA 4.5 – Espectro da FFT para a série temporal dos totais anuais, região do posto de Caucaia.

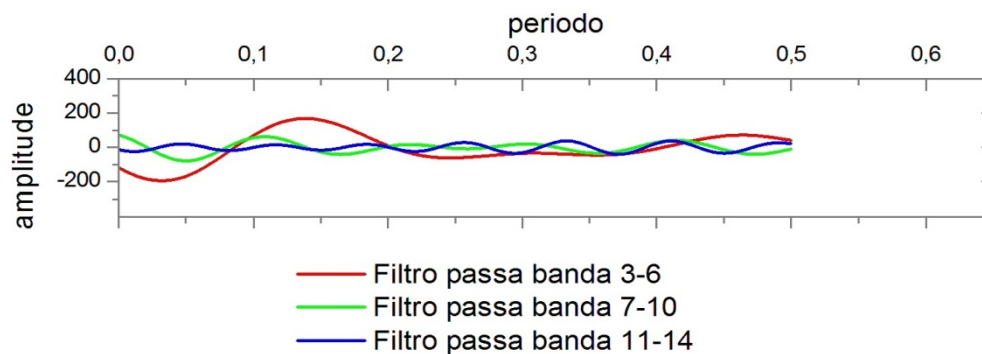


FIGURA 4.6 – Filtro passa banda para a série temporal do posto de Caucaia.

A filtragem passa banda 3-6 mostra uma variação da amplitude entre -200 a 200, porém não mostra modo de variabilidade representativo. Para o filtro passa banda 7-10 percebe-se um período curto de baixas amplitudes com variações entre -80 a 80. Há possíveis dois modos de variabilidade na filtragem 11-14 sendo que um modo de variabilidade de período curto com baixa amplitude e outro de período mais longo com maior amplitude.

4.1.3 – Região do Cariri - Posto de Crato

O posto Crato tem sua posição geográfica de latitude -7:14:0 e longitude -39:24:0 altitude de 421 metros acima do nível do mar pertencente e a sub-bacia do Rio Jaguaribe (número 36). Seu código como referência nacional é 00739006 tendo um código adicional 3841425 tendo como responsável e operadora a FUNCEME. O histórico do índice pluviométrico total anual do posto Crato é mostrado na Figura 4.7:

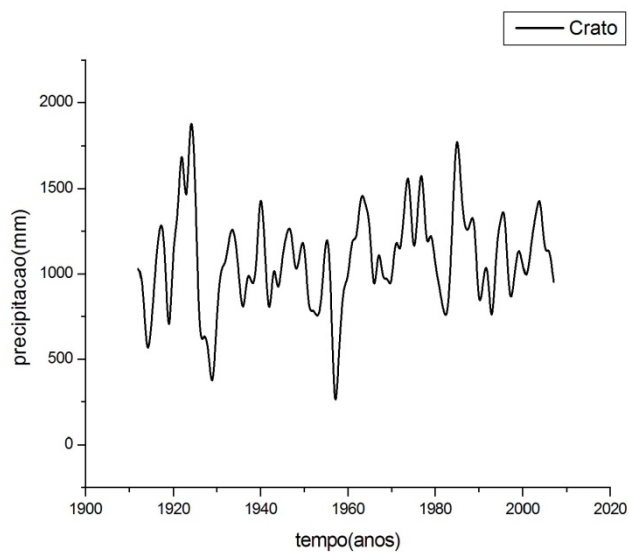


FIGURA 4.7 – Série de precipitação total anual para o posto de Crato (1912 – 2007).

A análise de Fourier foi aplicada aos dados da série temporal, permitindo uma transformação da função no domínio do tempo para o domínio da frequência, onde podemos verificar uma possível existência de períodos dominantes para os seguintes anos. A Figura 4.8 mostra o resultado:

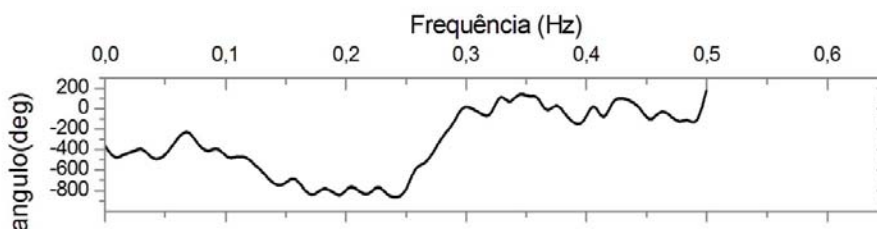


FIGURA 4.8 – Espectro da FFT para a série temporal dos totais anuais, região do posto de Crato.

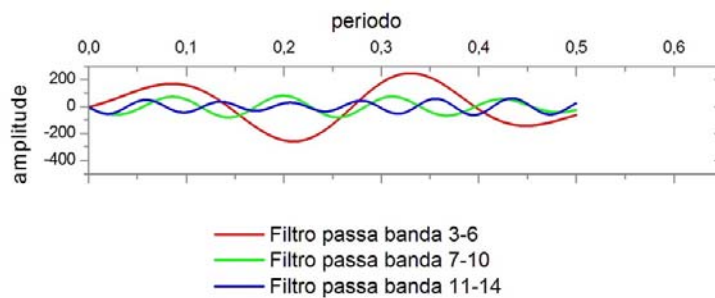


FIGURA 4.9 – Filtro passa banda para a série temporal do posto de Crato.

A filtragem passa banda 3-6 não apresenta modo de variabilidade bem definido, no entanto, percebe-se uma variação significativa em sua amplitude acima de 200. O filtro passa banda 7-10 há presença de um modo de variabilidade de período longo, porém de baixa amplitude. Com relação ao filtro passa banda 11-14, o mesmo mostra dois modos de variabilidade, sendo que, um modo apresenta período relativamente longo e outro de período curto com alta variação, porém de baixa amplitude.

4.1.4 – Região do Jaguaribe - Posto de Jaguaruana

Na cidade de Jaguaruana, o posto Jaguaruana tem seu código nacional de localização que é 00437006 com um código adicional 2894643 pertencente à Sub-bacia do Rio Jaguaribe (número 36) tendo como a FUCEME sua responsável e operadora. Sua posição geográfica é latitude -4:50:0 com longitude -37:47:0 e tendo uma altitude de 15 metros em relação ao nível do mar. O histórico do índice pluviométrico total anual do posto Jaguaruana é mostrado na Figura 4.10:

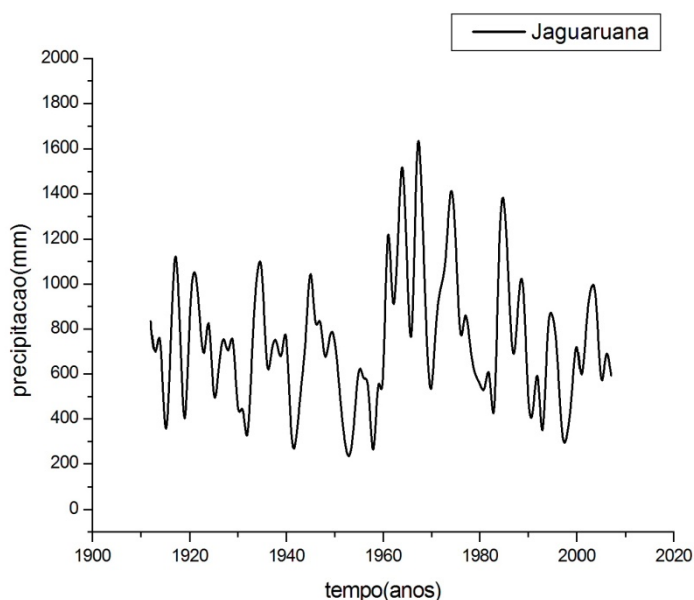


FIGURA 4.10 – Série de precipitação total anual para o posto de Jaguaruana (1912 – 2007).

A análise de Fourier foi aplicada aos dados da série temporal, permitindo uma transformação da função no domínio do tempo para o domínio da frequência, onde podemos verificar uma possível existência de períodos dominantes para os seguintes anos. A Figura 4.11 mostra o resultado:

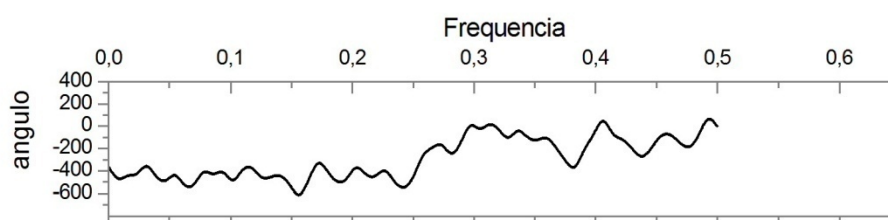


FIGURA 4.11 – Espectro da FFT para a série temporal dos totais anuais, região do posto de Jaguaruana.

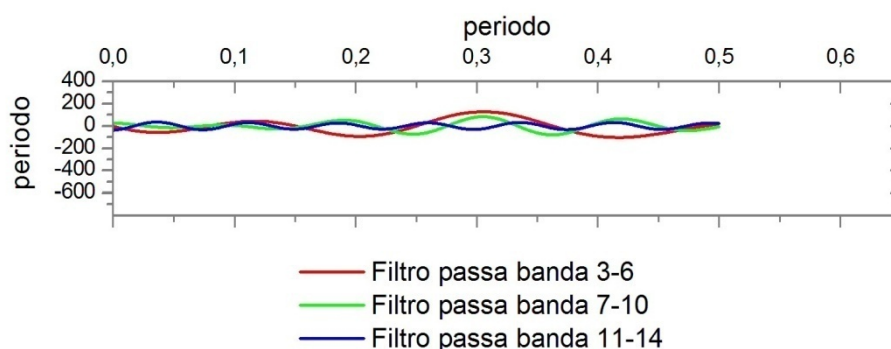


FIGURA 4.12 – Filtro passa banda para a série temporal do posto de Jaguaruana.

O filtro passa banda 3-6 não apresenta modo de variabilidade bem definida, no entanto, apresenta pico de variação em sua amplitude menor que 150. Para o filtro passa banda 7-10 apresenta possíveis dois modos de variabilidade com pouca variação de baixa amplitude e de curtos períodos. Com relação ao filtro passa banda 11-14 percebe-se um modo de variabilidade com alta variação, com período longo e baixa amplitude.

4.1. 5 – Região do Sertão Central - Posto de Campos Sales

O posto Campos Sales leva o nome da cidade onde está localizada. Seu código nacional de localização é 00740006 com um código adicional 3749125 pertencente a Sub-bacia do Rio Jaguaribe (número 36) tendo como a FUCEME sua responsável e operadora. Sua posição geográfica é latitude -7:4:0 com longitude -40:22:0 e tendo uma altitude de 551 metros em relação ao nível do mar. O histórico do índice pluviométrico total anual do posto Campos Sales é mostrado na Figura 4.13:

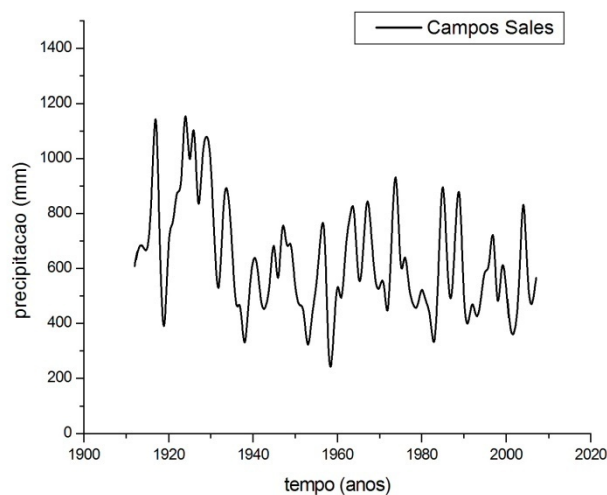


FIGURA 4.13 – Série de precipitação total anual para o posto de Campos Sales (1912 – 2007).

A análise de Fourier foi aplicada aos dados da série temporal, permitindo uma transformação da função no domínio do tempo para o domínio da frequência, onde podemos verificar uma possível existência de períodos dominantes para os seguintes anos. A Figura 4.14 mostra o resultado:

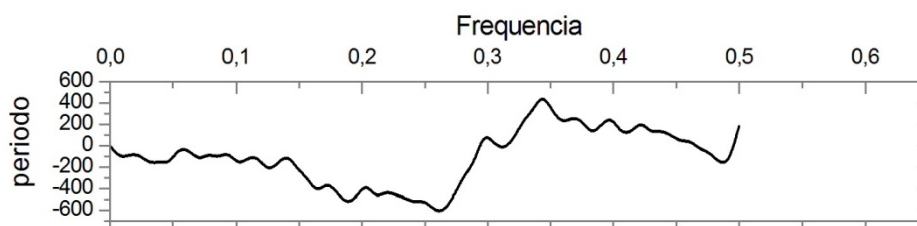


FIGURA 4.14 – Espectro da FFT para a série temporal dos totais anuais, região do posto de Campos Sales.

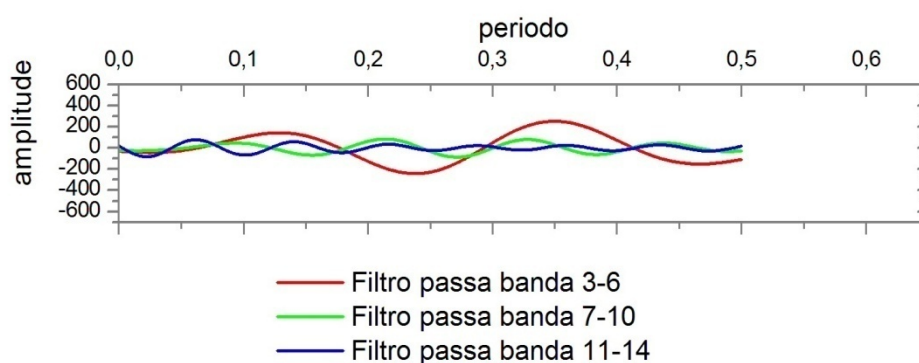


FIGURA 4.15 – Filtro passa banda para a série temporal do posto de Campos Sales.

Na filtragem, o filtro passa banda 3-6 mostra alta variação em sua amplitude ao longo período, no entanto, não há aparentemente indícios de modo de variabilidade bem definido. Com em relação ao filtro passa banda 7-10 há possível modo de variabilidade definido, sendo de baixa amplitude e de curto período. Para o filtro passa banda 11-14 apresenta modo de variabilidade de baixa amplitude e de longo período.

4.1.6 – Região do Sertão Central - Posto de Senador Pompeu

Na cidade de Senador Pompeu, o posto Senador Pompeu tem seu código nacional de localização que é 00539037 com um código adicional 3811129 pertencente à Sub-bacia do Rio Jaguaribe (número 36) tendo como a ANA sua responsável e operadora sendo CPRM. Sua posição geográfica é latitude -5:34:42 com longitude -39:0:54 e tendo uma altitude de 173 metros em relação ao nível do mar. O histórico do índice pluviométrico total anual do posto Senador Pompeu é mostrado na Figura 4.16:

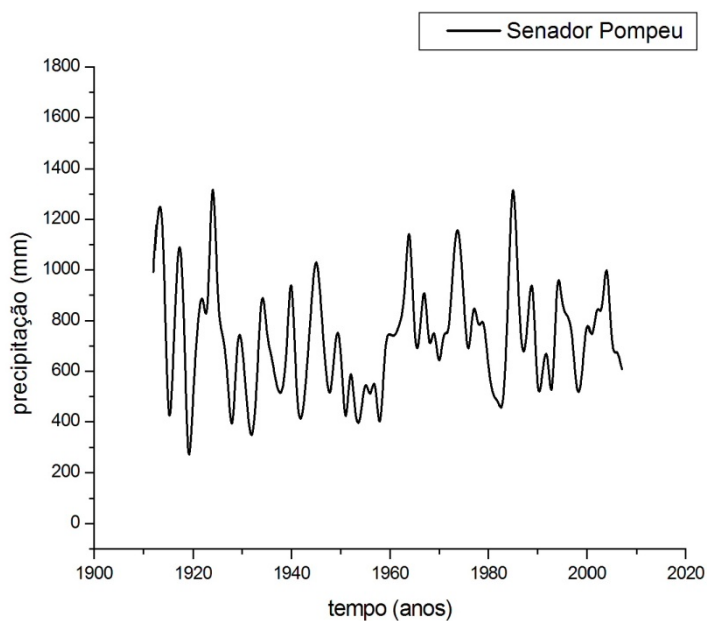


FIGURA 4.16 – Série de precipitação total anual para o posto de Senador Pompeu (1912 – 2007).

A análise de Fourier foi aplicada aos dados da série temporal, permitindo uma transformação da função no domínio do tempo para o domínio da frequência, onde podemos verificar uma possível existência de períodos dominantes para os seguintes anos. Figura 4.17 mostra o resultado:

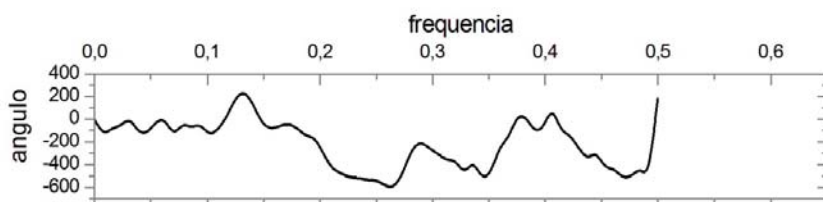


FIGURA 4.17 – Espectro da FFT para a série temporal dos totais anuais, região do posto de Senador Pompeu

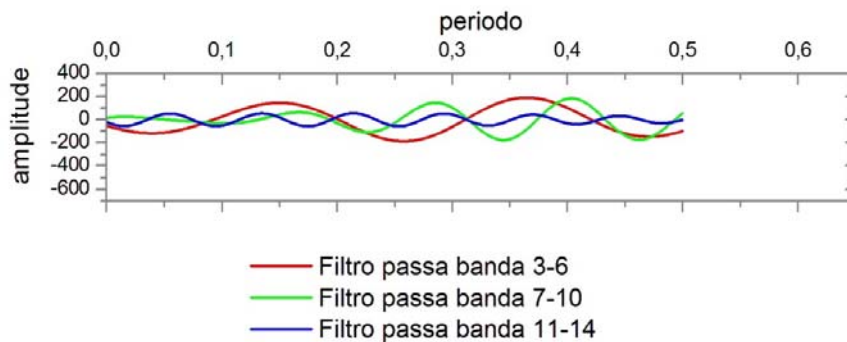


FIGURA 4.18 – Filtro passa banda para a série temporal do posto de Senador Pompeu.

O filtro passa banda 3-6 apresenta uma variação alta em sua amplitude. Com relação ao filtro passa banda 7-10 indica um modo de variabilidade de alta amplitude com alta variação de curto período. No filtro passa banda 11-14 percebe-se um modo de variabilidade de longo período com alta variação e de baixa amplitude.

4.1.7 – Região Litoral Pecém - Posto de Acarape

Na cidade de Acarapé, o posto Acarapé tem seu código nacional de localização que é 00438051 com um código adicional 2882458 pertencente à Sub-bacia do Rio Acaraú (número 35) tendo como a FUCEME sua responsável e operadora. Sua posição geográfica é latitude -4:13:0 com longitude -38:42:0 e tendo uma altitude de 76 metros em relação ao nível do mar. O histórico do índice pluviométrico total anual do posto Acarape é mostrado na Figura 4.19:

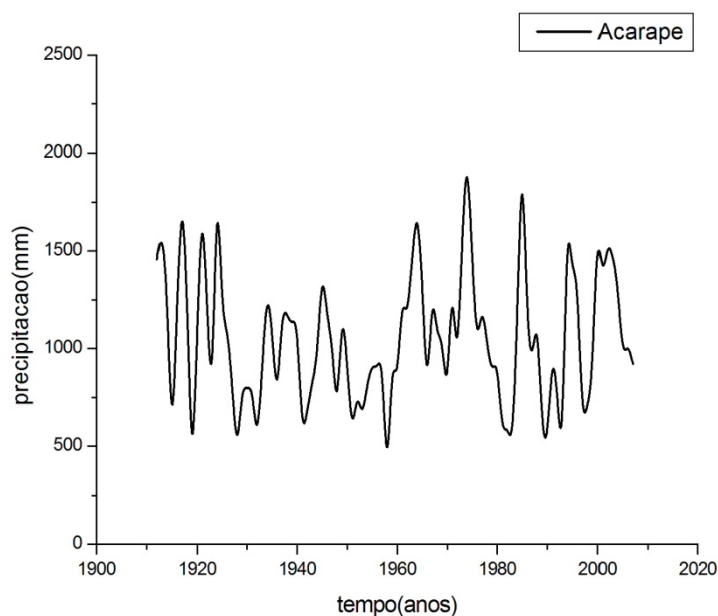


FIGURA 4.19 – Série temporal dos totais anuais, região do posto de Senador Acarape (1912 – 2007).

A análise de Fourier foi aplicada aos dados da série temporal, permitindo uma transformação da função no domínio do tempo para o domínio da frequência, onde podemos

verificar uma possível existência de períodos dominantes para os seguintes anos. A Figura 4.20 mostra o resultado:

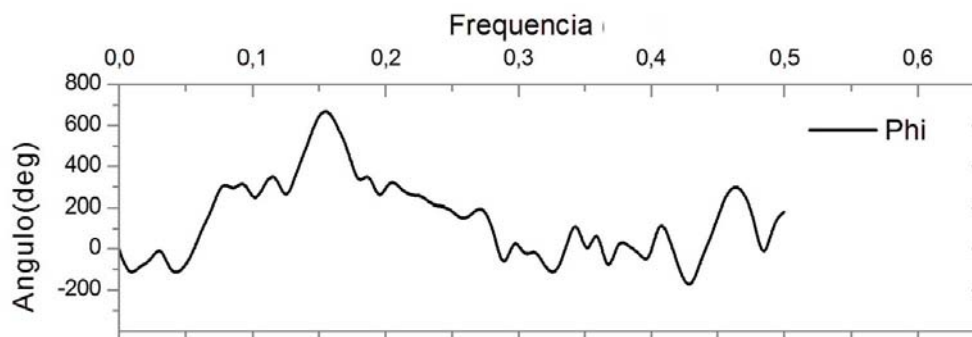


FIGURA 4.20 – Espectro da FFT para a série temporal dos totais anuais, região do posto de Acarape.

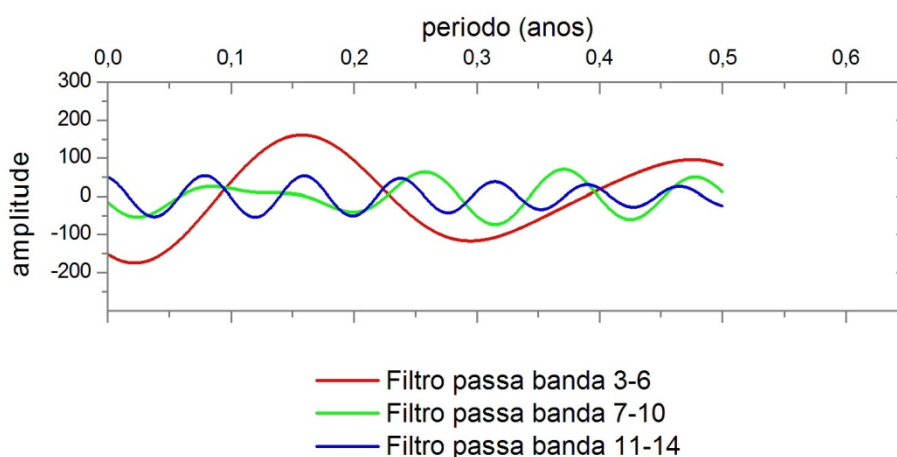


FIGURA 4.21 – Filtro passa banda para a série temporal do posto de Acarape.

O Filtro passa banda 3-6 apresenta alta amplitude com pouca variação ao longo da curva. No filtro passa banda 7-10 há dois possíveis modos de variabilidade de baixas amplitudes e períodos longos. O filtro passa banda 11-14 mostra um modo de variabilidade de período longo à baixa amplitude e diminuindo ao longo do tempo.

Ao ver as curvas de filtragem há um indicio que os postos relativamente mais próximos ao litoral no caso Caucaia e Jaguaruana, figuras 4.7 e 4.12 respectivamente, têm características com menos irregularidade, tal fenômeno, sugere que os mesmos, dentro do sistema climatológico do estado, recebem uma maior influência da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT).

Apesar da diferenciação da variabilidade entre os postos de Jaguaruana e Crato o comportamento da frequência é semelhante. Tal indício sugere a influência das “Ondas de Leste” que dependendo de sua intensidade contribui significativamente no regime de chuva na parte leste do Estado do Ceará.

Em relação ao Sertão Central ocorre uma maior irregularidade na sua curva de filtragem em comparação com as demais Macrorregiões, no entanto, seus postos (Campos Sales e Senador Pompeu) apresentam comportamentos semelhantes.

O posto de Acarape apresenta um regime intermitente linear e cíclico. Apesar de o posto estar localizado na Macrorregião do Maciço de Baturité, o mesmo tem a localidade próxima da Macrorregião Litoral de Fortaleza, possibilitando uma influência dessa Macrorregião sobre a curva gerada através dos dados presente no estudo.

Com relação à associação das séries históricas dos postos selecionados e suas respectivas curva de filtragem verifica-se que há diferenciação entre as curvas em certos momentos, no entanto, a curva passa banda segue a tendência da série histórica possibilitando assim uma possível construção de cenário sobre o regime de chuva de cada Macrorregião do Estado do Ceará.

4.2 – CENÁRIOS

Para minimizar o efeito de escala os resultados da construção de cenários obtidos foram padronizados. Esta padronização se dá pela fórmula:

$$z = \frac{x_0 - x_m}{\sigma}$$

Onde x_0 é o dado em questão, x_m a média da série e σ o desvio padrão da série. Vale ressaltar que todos os resultados que seguem foram padronizados

Associando a série histórica do posto em questão com a curva filtro passa banda e padronizando seus valores para uma visualização entres as curvas é visto que a curva filtro passa banda segue a tendência da série histórica, assim fazendo uma projeção média ao longo do tempo. Em relação aos cenários mostra-se, através a verificação dos gráficos obtidos, que nos próximos anos há uma variação nos níveis de chuvas em relação à média, sendo que para algumas Macrorregiões mais significativas do que outras. As curvas obtidas pela filtragem

passa banda da Transformada de Fourier da curva phi denotaremos como $FFTP_{\phi}$ e a construção dos cenários foi obtida através da soma dos três níveis de filtragem estabelecidas para realização deste trabalho e que foram ditas anteriormente no início deste capítulo.

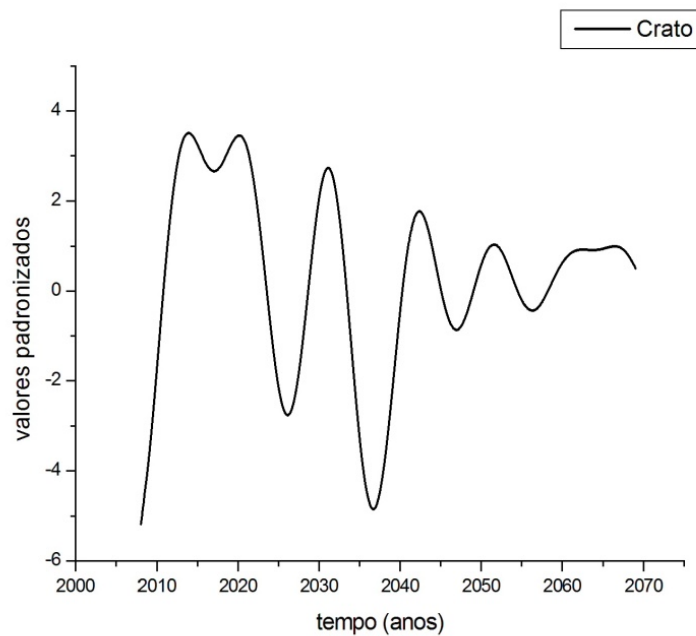


FIGURA 4.22 – Cenários para o posto do Crato com valores padronizados

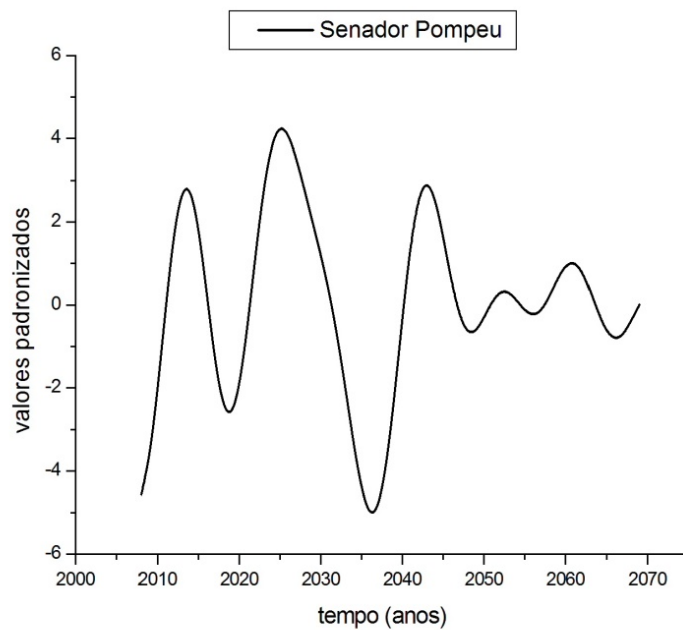


FIGURA 4.23 – Cenários para o posto do Senador Pompeu com valores padronizados

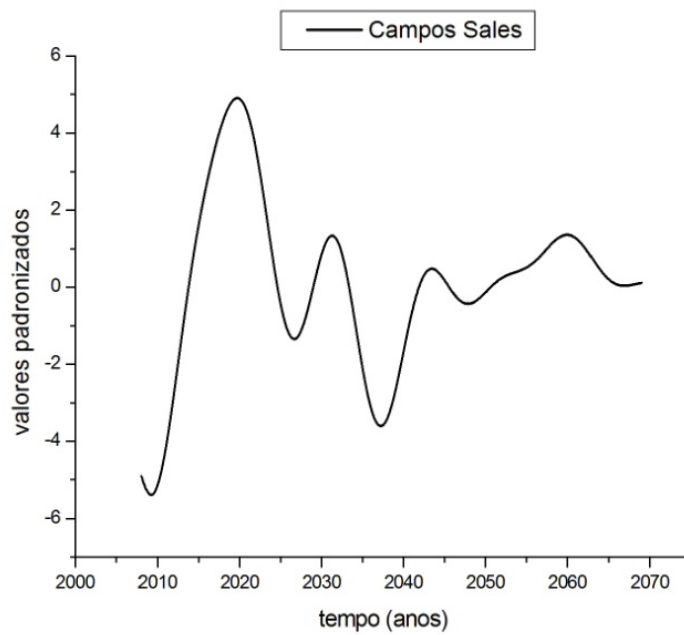


FIGURA 4.24 – Cenários para o posto do Campos Sales com valores padronizados

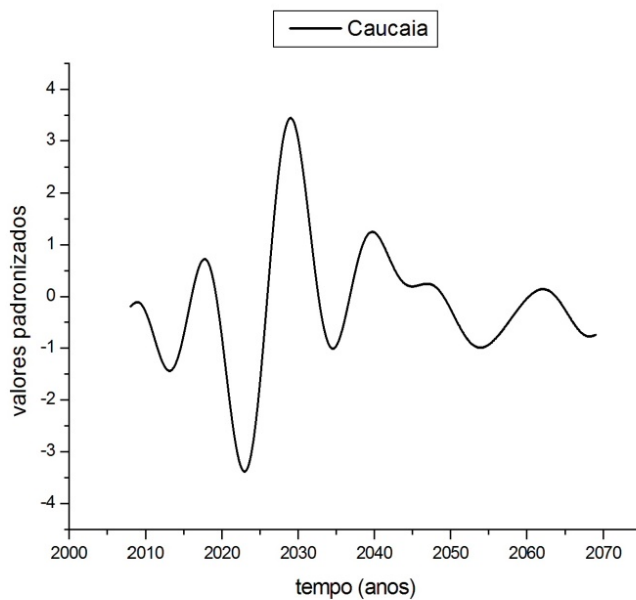


FIGURA 4.25 – Cenários para o posto do Caucaia com valores padronizados

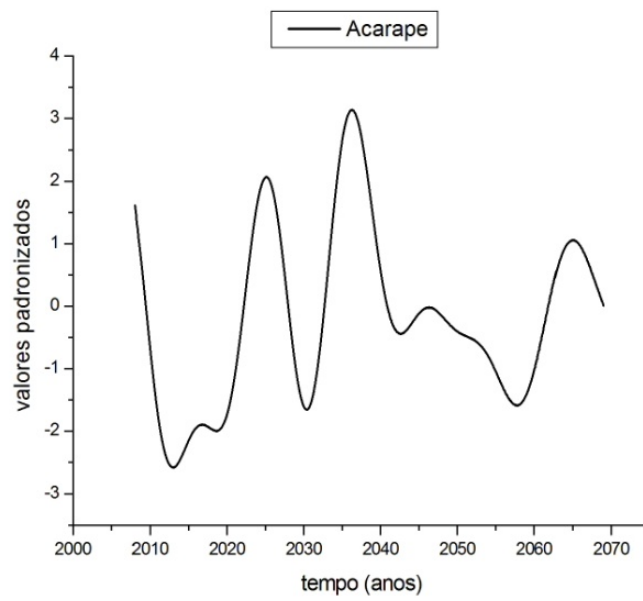


FIGURA 4.26 – Cenários para o posto do Acarape com valores padronizados

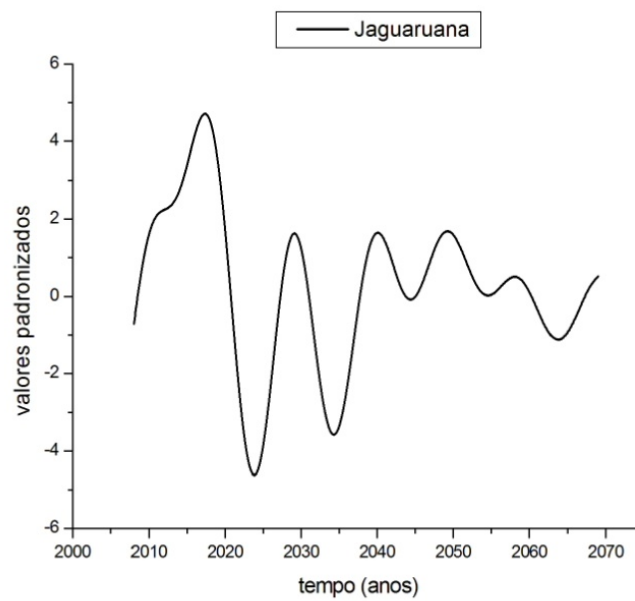


FIGURA 4.27 – Cenários para o posto do Jaguaruana com valores padronizados

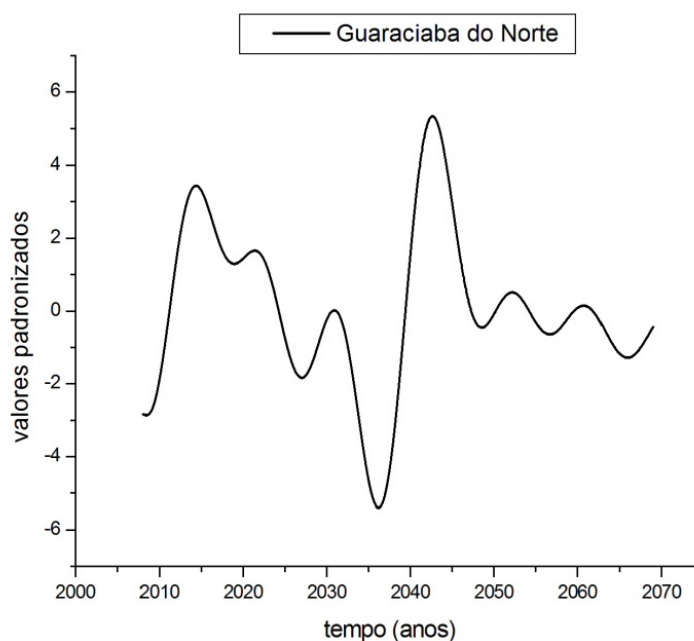


FIGURA 4.28 – Cenários para o posto do Guaraciaba do Norte com valores padronizados

Nos cenários obtidos percebe-se que há uma grande variabilidade entre os anos dando em certos momentos valores extremos indicando possíveis períodos de chuvas muito acima ou abaixo da média.

Em quase todos os postos, os cenários, mostraram um queda no nível de chuva com relação à média entre os anos de 2035 a 2040, sendo que para alguns postos mais significativos que em outros. Esta situação é exceção para o cenário do posto de Acarape que indica o nível de chuva acima em relação a média da sua macrorregião.

4.3 – CÁLCULOS DE INCERTEZAS

Para o cálculo de incerteza foi aplicado para toda série temporal total anual de cada posto o método para construção de cenários, e assim, obter um cenário para toda essa série. Tal cálculo foi realizado através da variância.

Na teoria da probabilidade e na estatística, a variância de uma variável aleatória é uma medida da sua dispersão estatística, indicando quão longe em geral os seus valores se encontram do valor esperado.

Se $\mu = E(X)$ é o valor esperado (média) da variável aleatória X , então a variância é

$$\text{var}(X) = E((X - \mu)^2).$$

Isto é, é o valor esperado do quadrado do desvio de X da sua própria média. Em linguagem comum isto pode ser expresso como "A média do quadrado da distância de cada ponto até a média". É assim a "média do quadrado dos desvios". A variância da variável aleatória " X " é geralmente designada por $\text{var}(X)$, σ_X^2 , ou simplesmente σ^2 . A definição acima pode ser usada quer para variáveis aleatórias discretas, quer para contínuas.

Para o cálculo de incerteza foi obtido à relação entre a variância dos dados da série temporal com os dados gerados através do programa. Primeiramente foi calculada a variância da série temporal e dividido pela variância obtida através dos dados do cenário construído.

Na Tabela 4.1 mostra os resultados das variâncias de cada posto e a relação entre as variâncias da série temporal e o seu respectivo cenário. Foi denotado como VAR_{st} sendo a variância da série temporal e VAR_c como sendo a variância do cenário obtido para o posto.

Tabela 4.1: Valores das variâncias e a relação entre elas.

Posto	VAR_{st}	VAR_c	$\text{VAR}_c/\text{VAR}_{\text{st}}$
Acarape	161907,86	8362,02	0,0516
Campos Sales	58566,57	8603,94	0,1469
Caucaia	202740,43	4567,56	0,0225
Crato	121522,03	9992,90	0,0822
Guaraciaba do Norte	259974,64	16679,70	0,0642
Jaguaruana	133687,38	3860,12	0,0289
Senador Pompeu	79245,09	11073,26	0,1397

Os valores obtidos com relação entre as variâncias, denotada como $\text{VAR}_c/\text{VAR}_{\text{st}}$, variam entre 2,25% (para o posto Caucaia) a 8,22% (para o posto Crato). Com exceção para os postos localizados na macrorregião Sertão Central, no qual, o posto Campos Sales teve a relação entre as variâncias no valor de 14,69% e o posto Senador Pompeu com o valor de 13,97% que apesar de serem valores baixos, em comparação aos demais postos, obtiveram valores significativos.

A relação entre as variâncias mostra uma taxa consideravelmente baixa entre os dados da série temporal e o cenário do posto.

As figuras a seguir mostram os gráficos das séries temporais e os cenários obtidos de cada posto. Os valores foram padronizados no intuito de evitar problemas de escala e obter uma melhor visualização dos resultados:

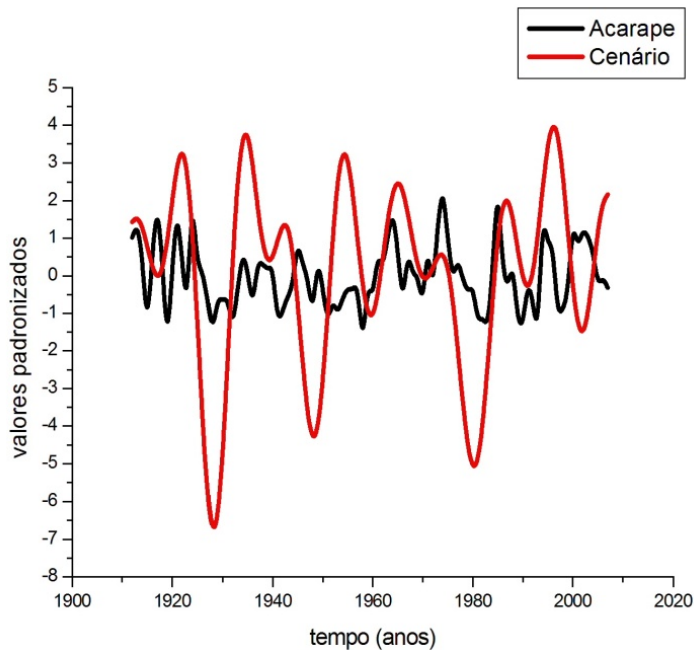


FIGURA 4.29 – Gráfico de. Acarape

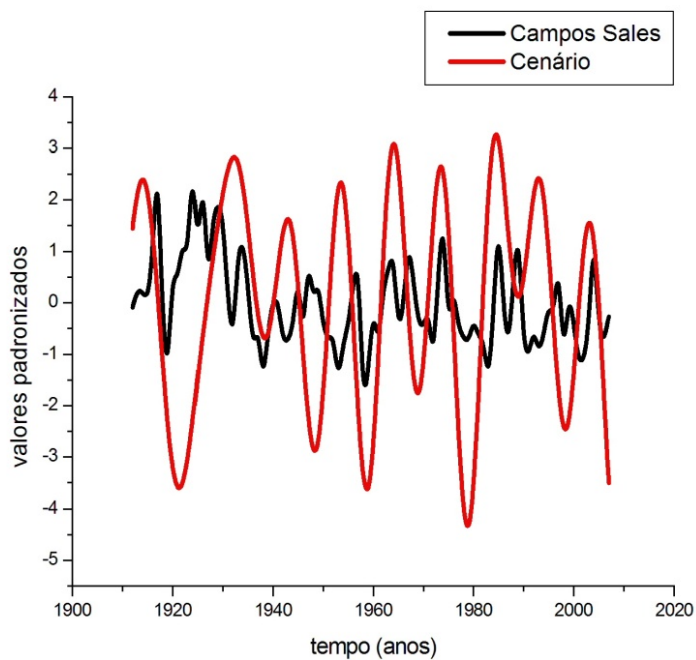


FIGURA 4.30 – Gráfico Campos Sales

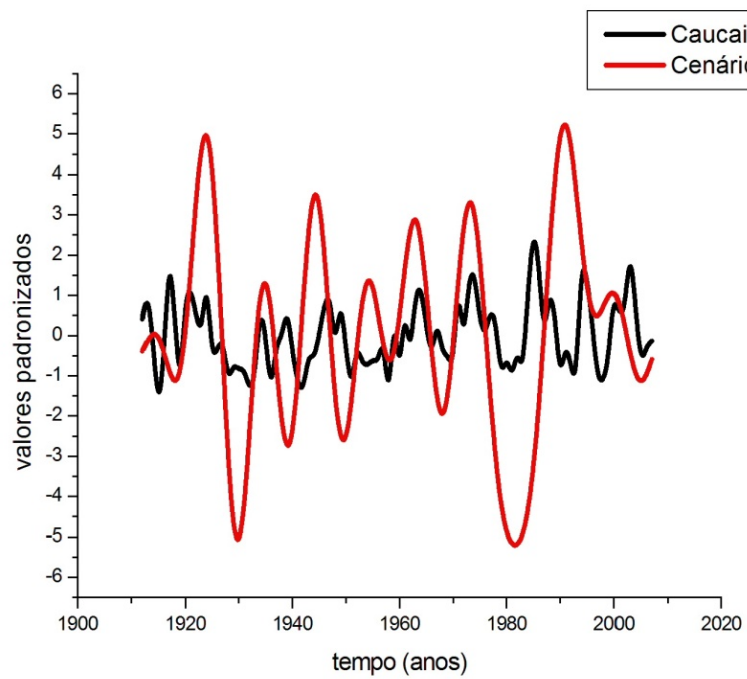


FIGURA 4.31 – Gráfico Caucaia

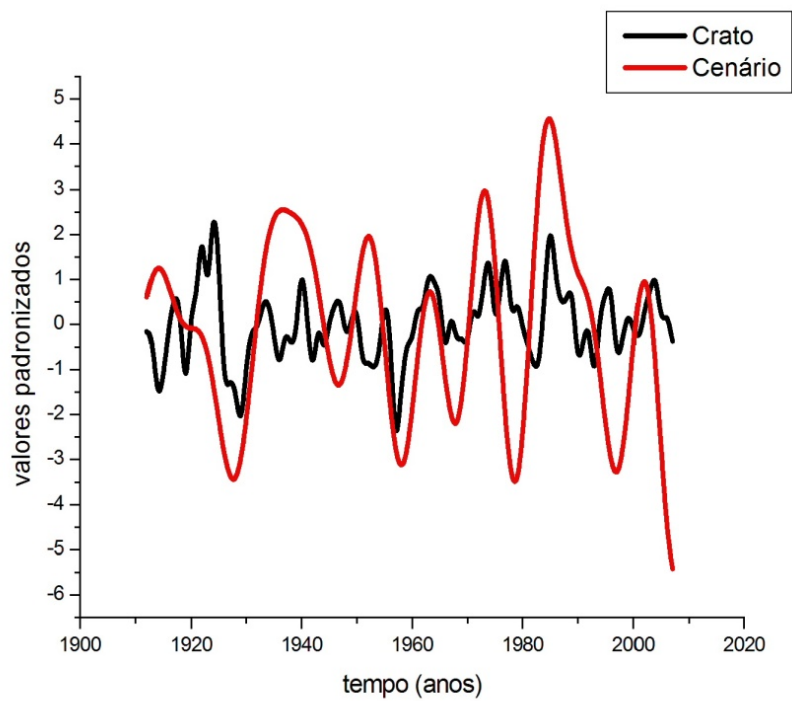


FIGURA 4.32 – Gráfico Crato

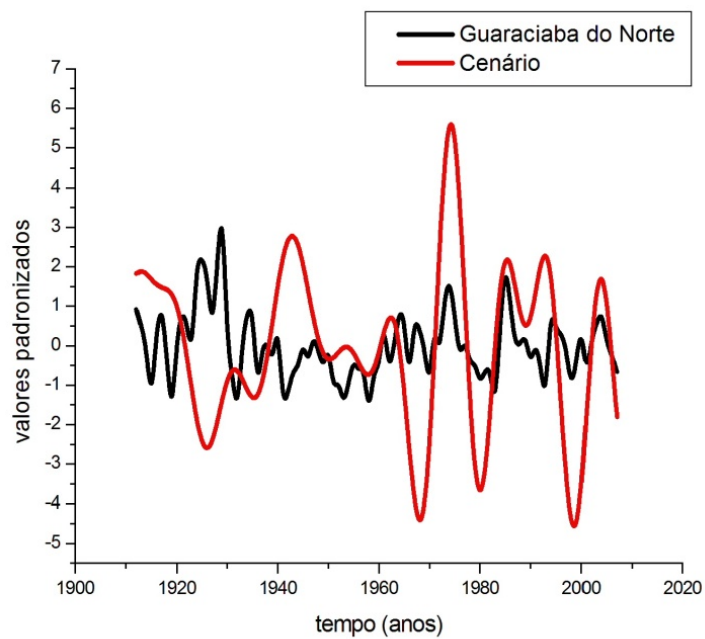


FIGURA 4.33 – Gráfico Guaraciaba do Norte

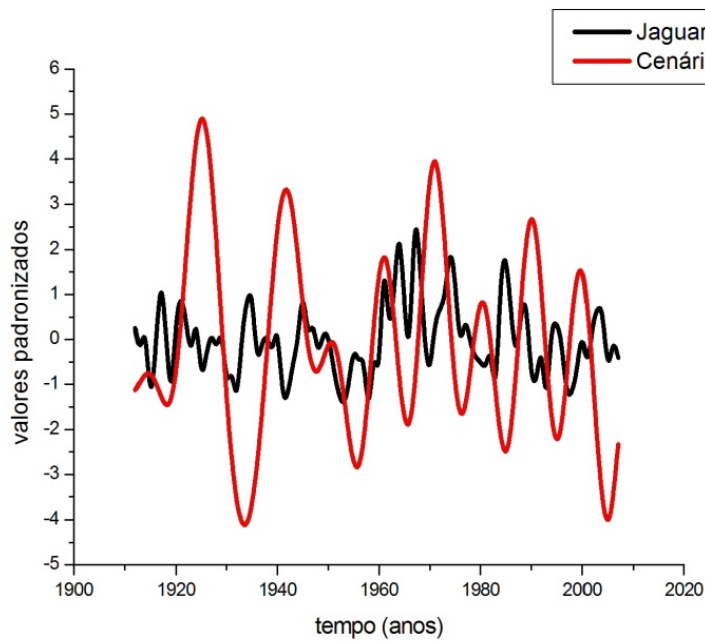


FIGURA 4.34 – Gráfico Jaguaruana.

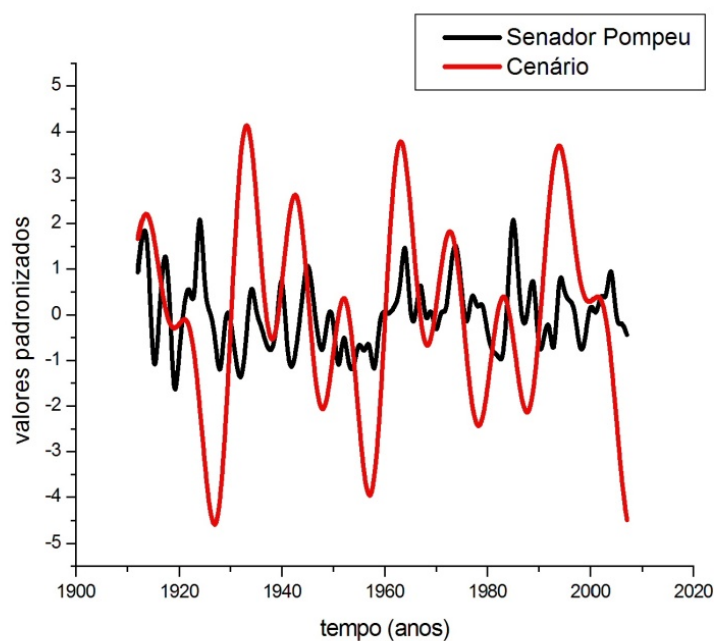


FIGURA 4.35 – Gráfico Senador Pompeu

Percebe-se que há uma disparidade entre os dados da série total anual do posto com seu respectivo cenário. O cenário obtido apresenta alta variação entre os anos indicando valores extremos, como período chuvoso ou de período de baixas chuvas, sendo que esses fatos não ocorreram naquele determinado ano.

4.4 - TESTE DO MÉTODO UTILIZADO

Com intuito de averiguar as curvas geradas com o objetivo de construir cenários e ver a tendência no nível do regime de chuva do Estado do Ceará dada por Macrorregiões foram realizados teste com as séries históricas totais anuais de chuvas.

O teste a seguir foi realizado com as séries históricas datada de 1912 a 1990 com o objetivo de prognosticar a variação no nível do regime chuva de 1991 a 2007 e comparar com a curva de tendência obtida com os cálculos realizados com dados desse período. Para melhor entendimento chamaremos a curva de tendência obtida com os dados de 1991 a 2007 de FFTphi (observado) e o cenário gerado de FFTphi (gerado).

A seguir, as figuras que mostram os resultados obtidos

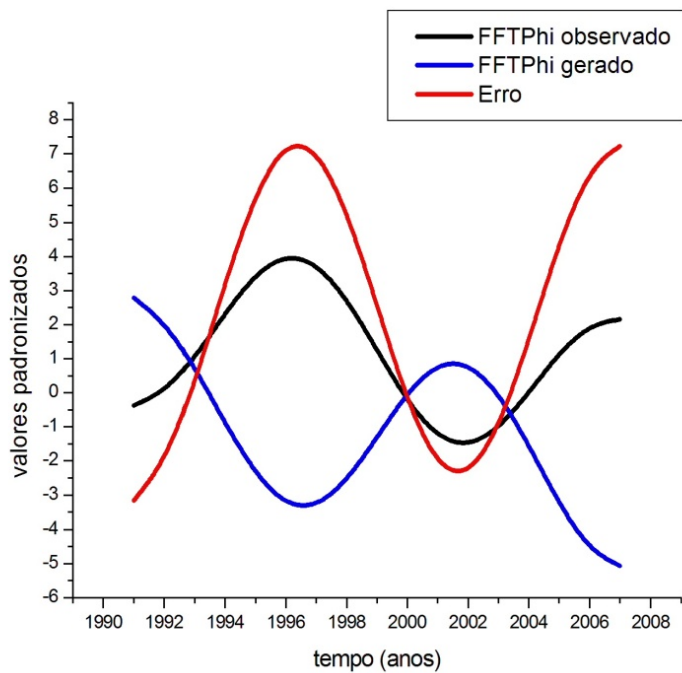


FIGURA 4.36 – Gráfico do erro do posto de Acarape

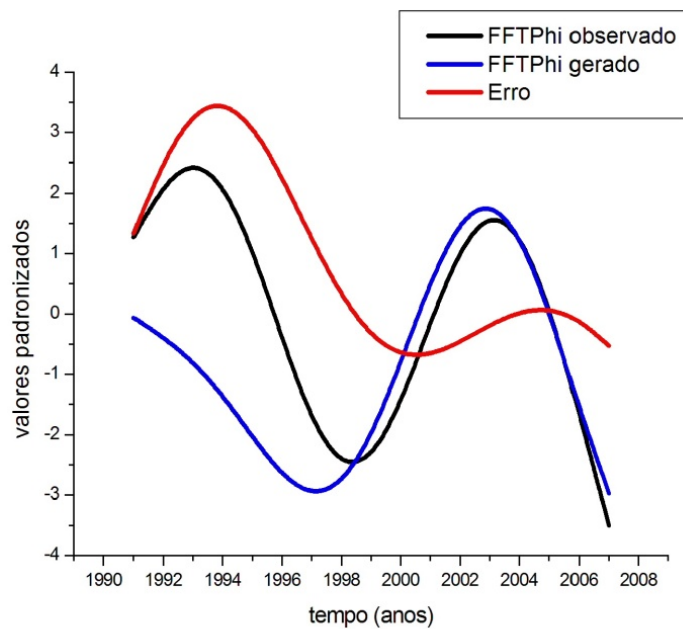


FIGURA 4.37 – Gráfico do erro do posto de Campos Sales

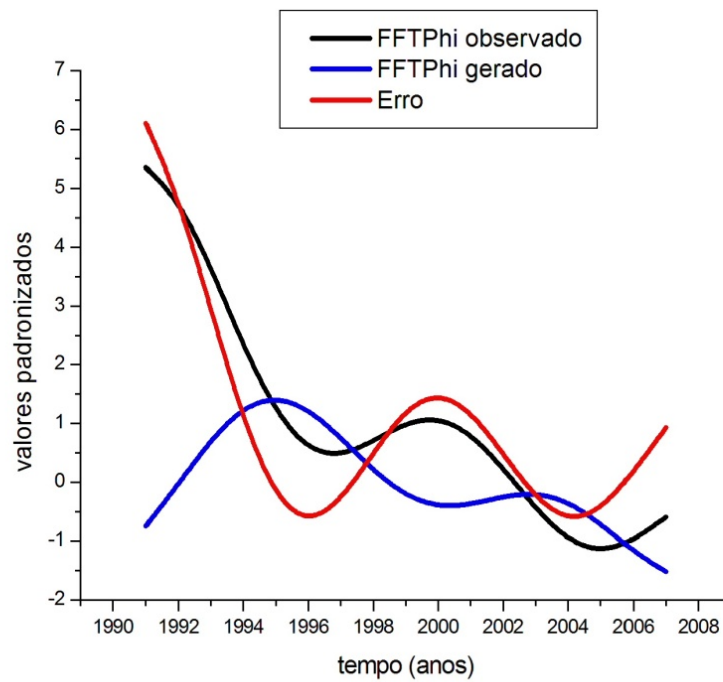


FIGURA 4.38 – Gráfico do erro do posto de Caucaia.

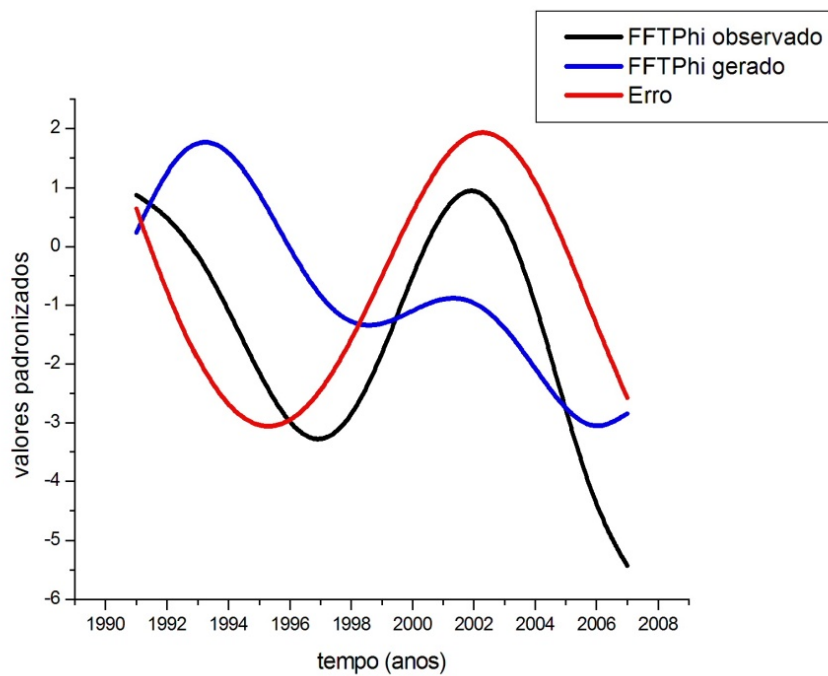


FIGURA 4.39 – Gráfico do erro do posto de Crato.

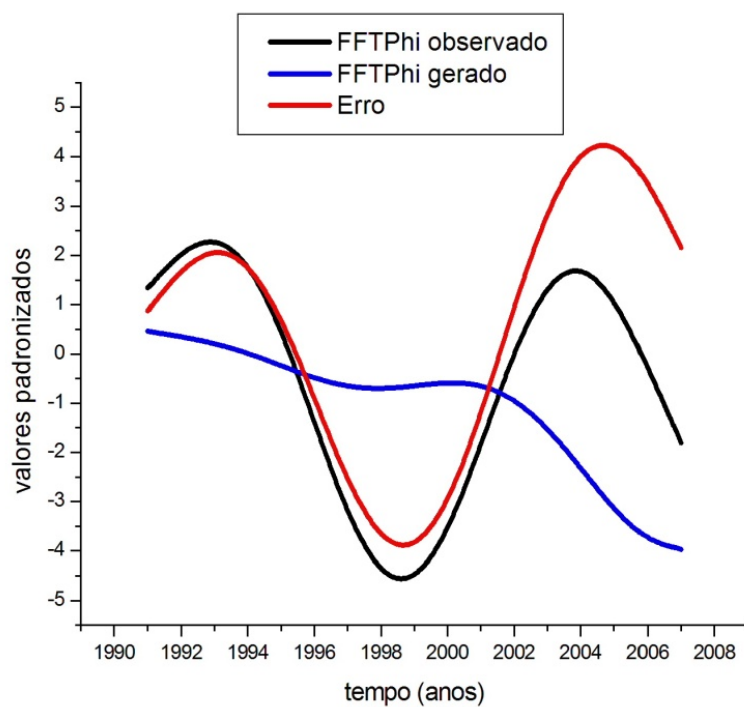


FIGURA 4.40 – Gráfico do erro do posto de Guaraciaba do Norte.

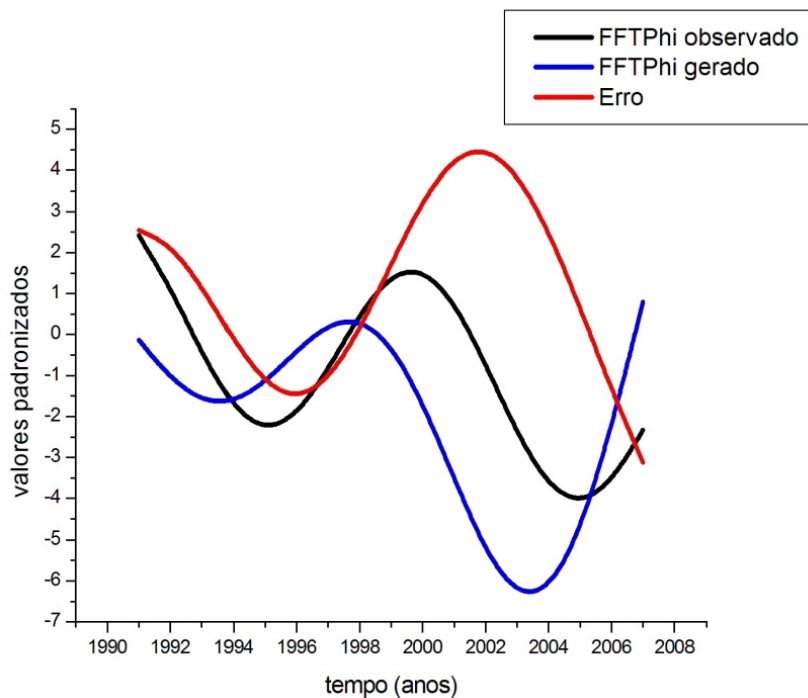


FIGURA 4.41 – Gráfico do erro do posto de Jaguaruana.

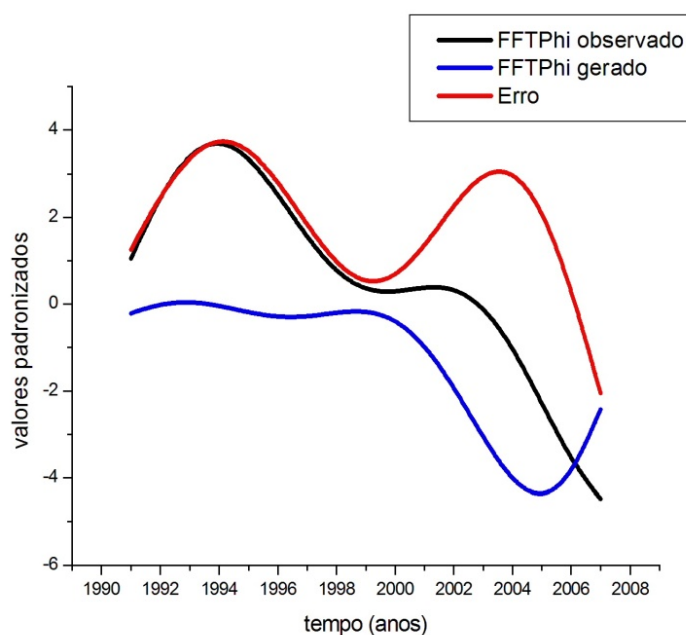


FIGURA 4.42 – Gráfico do erro do posto de Senador Pompeu.

A curva em vermelho representa a disparidade entre as curvas FFTPhi observado e a FFTPhi gerado, ou seja, o erro. Esse erro é obtido pela diferença entre essas curvas ($\text{Erro} = \text{FFTPhi observado} - \text{FFTPhi gerado}$).

Os resultados obtidos mostram alta disparidade entre as curvas, sendo que para alguns postos mais relevantes. No caso do posto Acarape, Figura 4.36, possui o maior erro e há caso que o erro diminui ao longo do tempo como no posto de Campos Sales e Caucaia, Fig. 4.37 e 4.38, respectivamente. E nos demais postos, o erro foi bastante considerável.

CAPÍTULO 5

5 - CONCLUSÕES

5.1 – *Conclusões finais*

O método aplicado há uma base matemática consolidada possibilitando a aplicação em estudos de séries temporais, em diversas áreas, visto em trabalhos como de Schneider em que à aplicação da Transformada de Fourier apresentou resultados satisfatórios mostrando padrões de variabilidade interanual e atividade na banda intrasazonal.

No trabalho realizado a Análise de Fourier para caracterização das macrorregiões em relação aos dados obtidos apresentou resultados satisfatórios, no caso, correlacionando as macrorregiões entre si e com os sistemas climatológicos atuante no Estado. Tais observações sugerem possíveis correlações entre os postos, ou seja, que o mesmo sistema climatológico influencia o nível de regime pluviométrico de macrorregiões homogêneas distintas.

No entanto, a Análise de Fourier demonstrou ser uma ferramenta não muito eficaz ao tratar de séries temporais pluviométrica do Estado do Ceará para construção de cenários.

Os cenários apresentaram altas variações em seu comportamento indicando anos de extrema escassez, logo após, anos de extrema abundância em relação à média no nível de chuva da macrorregião, sendo que, para algumas macrorregiões mais significativas em relação à outra.

A pouca eficiência do método aplicado na série temporal pluviométrica utilizada é mostrado ao aplicar o cálculo da variância na qual foram obtidos resultados insatisfatórios por apresentar baixo índice entre 2% a 8% em sua variância, com exceção dos postos localizados no Sertão Central que apresentou entre 13% a 15%. E na aplicação do teste do método onde o índice de erro obtido teve um valor considerável nas macrorregiões com alta variação nos resultados com exceção, novamente, para os postos do Sertão Central, no qual, o erro obtido diminuía ao longo do tempo. Tal razão pode ser explicado devido ao alto índice de variabilidade pluviométrica que ocorre ano a ano no Estado do Ceará decorrente a sua posição geográfica e os sistemas climatológicos atuante nessa região.

A exceção ocorre na Macrorregião Sertão Central onde o teste do método mostra que o erro obtido diminui ao longo dos resultados. Tais resultados sugerem que a macrorregião

Sertão Central apresenta uma característica diferenciada sugerindo um estudo específico para esta localização do Estado do Ceará.

É relevante ressaltar que a Análise de Fourier demonstra ser uma ferramenta consistente em seu método e dependendo das circunstâncias e variáveis em estudos apresentam resultados satisfatórios ou não.

5.2 – *Perspectivas futuras*

Continuidade de estudos referentes à análise de séries temporais utilizando outros métodos estocásticos aplicado ao conjunto de dados utilizado neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AZEVEDO, P. V. de; Silva, B. B. da; Rodrigues, M. F. G. Previsão estatística das chuvas de outono no Estado do Ceará. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.13, n.1, p.19-30, 1998.

BOX, George P; JENKINS, Gwilym, M. *Time Series Analysis : Forecasting and Control*. San Francisco : Holden-Day, 1976. p. 1 - 19.

CARVALHO, L, M, V: Métodos Observacionais em Climatologia e Meteorologia de Mesoescala. Notas de aula, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – IAG/USP, São Paulo, SP, 2007

CASTRO, A, C: Padrões de Variabilidade Intrasazonal sobre a Cidade de São Paulo e o Oceano Atlântico Sul Adjacente Utilizando a Análise de Ondeleita, no Período de 1982 a 2005. Dissertação de Mestrado, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – IAG/USP, São Paulo, SP, Outubro de 2007.

CHIERICE, R. A. F., 2003: O Uso de Wavelets na Detreminação do Expoente de Hurst de Uma Série Temporal Diária de Chuvas do Município de Araras-SP – de 1955-2000.

GIRARDI, C; GIRARDI, R, M; Previsão de Período de Seca para o Nordeste do Brasil, São José dos Campos, 2001.

JUDGE, George G. et al. *Introduction to the Theory and Practice of Econometrics*. 2th edition. New York : John Wiley & Sons Inc, 1988. p. 673 - 750.

KOUSKY, V. E.; CAVALCANTI, I. F. A., Eventos Oscilação Sul – evolução e anomalias de precipitação. *Ciência e Cultura*, 36(11), Novembro de 1984.

LORENZ, E.N.: The nature of the global circulation of the atmosphere: a present view. *The Global Circulation of the Atmosphere*, Roy.Meteor.Soc., London, 3-32, 1969.

LORENZ, E.N.: Can chaos and intransitivity lead to interannual variability? *Tellus*, 42A, 378-389, 1990.

MARTINS, M. E. G.; Introdução à Inferência Estatística, Departamento de Estatística e Investigação Operacional, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Abril 2006.

MELO, A, B, C; NOBRE, P; MELO, M, L, D; SANTANA, S, C: Estudo Climatológico da Posição da ZCIT no Atlântico Equatorial e sua Influência sobre o Nordeste do Brasil.

MELO, A. B. C. de. Previsibilidade da precipitação na Região Semi-Árida do Nordeste do Brasil, durante a estação chuvosa, em função do comportamento diário das chuvas na pré-estação. Dissertação de Mestrado em Meteorologia. Departamento de Ciências Atmosféricas (DCA). Universidade Federal da Paraíba – UFPB. Campina Grande-PB. 1997. 100 p.

MISITI M., MISITI Y., OPPENHEIM G., POGGI J. M., 1996, Wavelet Toolbox For Use With Matlab, The MathWorks Inc

MORETIN, Pedro A.; Análise de Séries Temporais / Pedro A. Moretin, Clécia M. C. Toloí – 2ª edição ver. e ampl. – São Paulo: Edgard Blucher, 2006.

MOURA, Geber B. de A., Et al; Relação Entre a Precipitação do Leste do Nordeste do Brasil e a Temperatura dos Oceanos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.13, n.4, p.462–469, Campina Grande, PB, UAEEA/UFCG, 2009

MOURA, A. D.; SHUKLA, J. On the Dynamics of Droughtsin Northeast Brazil: Observations, Theory, and Numerical Experiments with a General Circulation Model, *J. Atmos. Sci.*, v.38, n.12, p.2653-2675, 1981.

MUELLER, A.: Uma aplicação de Redes Neurais Artificiais na Previsão do Mercado Acionário; Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Florianópolis, 1996.

NELSON, Charles R. *Applied Time Series Analysis*. San Francisco : Holden-Day, 1973.

PHILANDER, S.G.: El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation. 1990. Academic Press, INC. San Diego, Califórnia

REBOITA, M.S; Elementos da Variabilidade Climática no Extremo Sul do Brasil, no Período de 1990 a 2001. Dissertação de Mestrado, Fundação Universidade Federal Do Rio Grande – FURG, Rio Grande, RS, Fevereiro de 2004.

SANTOS, A. M.; Inferência Estatística, Núcleo de Estatística e Informática HUUFMA

STUDART, T. M, C.; Apostila de Hidrologia Aplicada, 2002

SCHNEIDER, M; A Intrasazonalidade Nas Regiões Sul Sudeste E Centro-Oeste Do Brasil Durante Os Meses De Inverno. Dissertação de Mestrado, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – IAG/USP, São Paulo, SP, Fevereiro de 2004.

UVO, C. B., 1989: A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e sua relação com a precipitação na região norte do Nordeste brasileiro. Dissertação de Mestrado em Meteorologia. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais -INPE. São José dos Campos-SP, 88 p.

VITORINO, M, I: Análise das Oscilações Intrasazonais Sobre a América do Sul e Oceanos Adjacentes Utilizando a Análise de Ondeletas. Tese de Doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos, SP, Dezembro de 2002.

XAVIER, T. de Ma. B. S.; Tempos de Chuva: Estudos Climatológicos e de Previsão para o Ceará e o Nordeste Setentrional, 2001