MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS

AUTORIZAÇÃO PARA PUBLICAÇÃO
AUTHORIZATION FOR PUBLICATION

PALAVRAS CHAVES/KEY WORDS

AUTORES/AUTHORS

ZONA DE CONVERGÊNCIA INTERTROPICAL ZCIT
PRECIPITAÇÃO NO NORDESTE ITCZ
POSIÇÃO DA ZCIT

AUTORIZADA POR/AUTHORIZED BY

Ralf Gielow
Pres. C. Pós-graduação

AUTOR RESPONSAVEL
RESPONSIBLE AUTHOR

Cintia R. Bertacchi Uvo

DISTRIBUIÇÃO/DISTRIBUTION

- [ ] INTERNA / INTERNAL
- [x] EXTERNA / EXTERNAL
- [ ] RESTRITA / RESTRICTED

REVISADA POR / REVISED BY

V. B. Rao

CDU/UDC

551.509.54(812/814)

DATA / DATE

Agosto 1989

PUBLICAÇÃO Nº
PUBLICATION NO

INPE-4887-TDL/378

ORIGEM
ORIGIN

PG/CPT

PROJETO
PROJECT

FRH/MET

Nº DE PAG.
NO OF PAGES

99

ULTIMA PAG.
LAST PAGE

82

VERSÃO
VERSION

Nº DE MAPAS
NO OF MAPS

TÍTULO/TITLE

A ZONA DE CONVERGÊNCIA INTERTROPICAL (ZCIT) E SUA RELAÇÃO COM A PRECIPITAÇÃO DA REGIÃO NORTE DO NORDESTE BRASILEIRO

AUTORES/AUTHORSHIP

Cintia Regina Bertacchi Uvo

CENTRO DE INFORMAÇÃO E DOCUMENTAÇÃO
INPE
PATR. 94154
28 JAN. 1990
S. J. CAMPOS - SP.

RESUMO - NOTAS/ABSTRACT - NOTES

Apresenta-se neste trabalho uma análise observacional da influência do deslocamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) do oceano Atlântico sobre a precipitação na região norte do Nordeste do Brasil. Foi escolhida uma área de estudo compreendida entre 20°S, 30°N e 60°W e a costa oeste da África, área esta em que foram analisados elementos como as tensões de cisalhamento superficial zonal e meridional, a temperatura da superfície do mar e a posição da banda de máxima cobertura de nuvens, usada como representativa da posição da ZCIT. Como representantes da precipitação sobre o Nordeste foram usados índices de precipitação padronizados mensais, sazonais e anuais, calculados a partir de 116 estações espalhadas pelo Nordeste. Análises semelhantes foram feitas para um conjunto de anos secos e de anos chuvosos, e mostraram que é o tempo em que a ZCIT permanece próxima de suas posições mais ao sul que define a qualidade da estação chuvosa, pois define a duração desta.

OBSERVAÇÕES/REMARKS

Dissertação de Mestrado em Meteorologia, aprovada em 16 março 1989.

Aprovada pela Banca Examinadora
em cumprimento a requisito exigido
para a obtenção do Título de Mestre
em Meteorologia

Dr. João Antonio Lorenzzetti — Presidente

Dr. Carlos Afonso Nobre — Orientador

Dr. José Oribe Rocha de Aragão — Membro da Banca -convidado-

Dr. Valdo da Silva Marques — Membro da Banca -convidado-

Dr. Antonio Divino Moura — Membro da Banca

Dr. V.B.Rao — Membro da Banca

Candidato: Cíntia Regina Bertacchi

São José dos Campos, 16 de março de 1989

À Mulher,
união de emoção e força.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Dr. Carlos Afonso Nobre pelas valiosas idéias e sugestões.

Aos membros da banca examinadora pela disposição em analisar este trabalho, o que resultou no seu aperfeiçoamento.

Ao Instituto de Proteção ao Vôo pelo apoio e incentivo durante todas as fases deste trabalho.

À Fundação Cearence de Meteorologia e recursos Hídricos pelo apoio constante e financiamento de parte deste trabalho.

Ao Centro de Pesquisas Oceanográficas de Dakar-Thiaroye (CRODT) pela acolhida e apoio durante a coleta de dados da posição da Zona de Convergência Intertropical.

Ao Instituto de Pesquisas Espaciais pelo apoio.

Aos senhores Jean Citeau e Hervé Demarcq pela inestimável colaboração.

À Srta. Marília Prado de Carvalho pela revisão de linguagem.

Em especial às amigas Paula, Luciana e à minha família pelo estímulo nos momentos mais difíceis.

ABSTRACT

This work presents an observational analysis about the relationship between the displacement of the Intertropical Convergence Zone (ITCZ) over the Atlantic Ocean and the precipitation over north-northeast Brasil (Nordeste). An area between $20^{o}$S, $30^{o}$N and $60^{o}$W and the west coast of Africa was chosen for the analysis. The wind stress, sea surface temperature and the position of the maximum cloudiness over the ocean were analysed. The precipitation over Nordeste was represented by monthly, seazonal, and annual standardized indices of precipitation, calculated from 116 stations over Nordeste. A similar analysis made for a set of wet and dry years separately indicated that the key factor which determines the quality of the rainy season is the period that the ITCZ stays at its southermost position.

SUMÁRIO


Pág.

LISTA DE FIGURAS..... xi
LISTA DE TABELAS..... xiii
LISTA DE ABREVIATURAS..... xv

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO..... 1

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... 5

CAPÍTULO 3 - DADOS E METODOLOGIA..... 11

3.1 - Dados de Tensão de Cisalhamento do vento e Temperatura da Superfície do Mar..... 11
3.2 - Dados de Precipitação sobre o Nordeste..... 11
3.3 - Dados da Posição do Zona de Convergência Intertropical (ZCIT)..... 16

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS..... 23

4.1 - Temperatura da Superfície do Mar..... 23
4.2 - Tensão de Cisalhamento Superficial Zonal (TAUX)..... 27
4.3 - Tensão de Cisalhamento Superficial Meridional (TAUY)..... 30
4.4 - Médias de Tensão de Cisalhamento Superficial..... 33
4.5 - Persistência da TSM..... 37
4.6 - Coeficientes de Correlação entre índices de Precipitação e Posição da ZCIT..... 41
4.7 - Posição da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT)..... 44
4.8 - Posição da ZCA..... 57
4.9 - Sobre o "Salto" de fevereiro..... 58
4.10 - Banda Dupla da ZCIT..... 60
4.11 - Isolinhas de Precipitação para anos secos e chuvosos..... 61
4.12 - Espectro da posição da ZCIT..... 66

CAPÍTULO 5 - SUMÁRIO E CONCLUSÕES..... 73

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 80

LISTA DE FIGURAS

Pág.

3.1 - Região de estudo..... 12

3.2 - Distribuição das estações pluviométricas sobre o Nordeste do Brasil..... 15

3.3 - Série da posição da ZCA..... 20

4.1 - Isolinhas de correlação entre a precipitação do Nordeste e temperatura da superfície do mar..... 24

4.2 - Isolinhas de correlação entre a precipitação do Nordeste e tensão de cisalhamento superficial zonal..... 28

4.3 - Isolinhas de correlação entre a precipitação do Nordeste e a tensão de cisalhamento meridional..... 31

4.4 - Média da tensão de cisalhamento superficial de novembro a maio..... 34

4.5 - Diagramas de autocorrelação de anomalias de temperatura da superfície do mar..... 38

4.6 - Diagrama de autocorrelação para índices de precipitação mensal..... 43

4.7 - Posição latitudinal do eixo de nebulosidade convectiva sobre o Atlântico Equatorial..... 45

4.8 - Média da marcha anual da ZCIT..... 51

4.9 - Média da marcha anual da ZCA..... 52

4.10 - Médias para um conjunto de anos secos e anos chuvosos da posição da ZCIT..... 53

4.11 - Média para conjunto de anos secos da ZCA..... 54

4.12 - Imagem síntese METEOSAT..... 62

4.13 - Isolinhas de desvios padronizados de precipitação sobre o Nordeste..... 63

4.14 - Espectro da posição da ZCIT I..... 67

4.15 - Espectro da posição da ZCIT II..... 69

## LISTA DE TABELAS

Pág.

3.1 - Séries de valores dos índices de Hastenrath (1986) e Nobre e Paião (1986) anual e sazonal... 14

4.1 - Coeficientes de correlação entre a posição da ZCIT nos meses de novembro a agosto e a precipitação sazonal no Nordeste..... 42

4.2 - Coeficientes de correlação entre os índices de precipitação sazonal e anual de Nobre e Paião (1986) e os índices mensais de precipitação de novembro a julho..... 42

## LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|---|---|
| N | - norte |
| NE | - nordeste |
| Nordeste | - região norte do nordeste do Brasil |
| PNE | - precipitação sobre a região Norte do Nordeste do Brasil |
| PNEHs | - série de índices de precipitação sazonal de Hastenrarh (1986) para o Nordeste do Brasil |
| PNEIm | - série de índices mensais de precipitação para o interior do Nordeste do Brasil |
| PNELm | - série de índices mensais de precipitação para o litoral do Nordeste do Brasil |
| PNENPa | - série de índices de precipitação anual de Nobre & Paião (1986) para o Nordeste do Brasil |
| PNENPs | - série de índices de precipitação sazonal de Nobre & Paião (1986) para o Nordeste do Brasil |
| PNETm | - série de índices mensais de precipitação para toda a região do norte do Nordeste do Brasil |
| S | - sul |
| SE | - sudeste |
| TAU | - tensão de cisalhamento superficial |
| TAUX | - tensão de cisalhamento superficial zonal |
| TAUY | - tensão de cisalhamento superficial meridional TSM -temperatura da superfície do mar |
| UTIS | - unidade de tratamento de imagens de satélite |
| W | - oeste |
| ZCA | - Zona de Confluência dos Alísios |
| ZCIT | - Zona de Convergência Intertropical |

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

A precipitação da região norte do nordeste do Brasil (referida neste trabalho simplesmente como Nordeste) foi relacionada por vários autores como Hastenrath & Heller (1977), Moura & Shukla (1981), entre outros, com anomalias de grande escala na circulação atmosférica sobre o Atlântico e também com o padrão de temperaturas da superfície desse oceano (TSM).

Precipitação acima (abaixo) da média climatológica durante a estação chuvosa do Nordeste foi ligada a um padrão de dipolo de TSM com anomalias positivas (negativas) de TSM sobre o Atlântico Tropical Sul e negativas (positivas) sobre o Atlântico Tropical Norte. Considerando a circulação atmosférica sobre o Atlântico, anomalias positivas (negativas) de precipitação foram relacionadas com uma intensificação (enfraquecimento) da alta dos Açores e conseqüentemente dos alísios de NE, e com um enfraquecimento (fortalecimento) da alta do Atlântico Sul e, portanto, dos alísios de SE. Segundo Servain & Seva (1987), essa configuração de intensidades diferentes entre as altas deslocaria a Zona de Confluência dos Alísios (ZCA) para regiões mais ao sul (norte) que sua posição normal.

É largamente difundido e aceito que o sistema gerador de precipitação sobre o Nordeste é a proximidade da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Esse fato é facilmente observável quando se considera que o pico de precipitação sobre o Nordeste (março e abril) ocorre exatamente na época em que a ZCIT atinge suas posições mais ao sul.

A influência da TSM sobre a precipitação no Nordeste é explicável considerando que a ZCIT se localiza sobre a região de mais altas TSMs (Moura & Shukla, 1981, Saha, 1981) . Desta forma, se o Atlântico Tropical Norte apresentar TSMs mais altas que o Atlântico Sul, a ZCIT tenderá a permanecer em regiões mais ao norte, acarretando um ano seco para o Nordeste. A situação inversa trará a ZCIT para posições mais ao sul, de tal forma que se terá um ano chuvoso.

Sabe-se também que a ZCIT tende a se localizar fora das regiões de ventos mais fortes; desta forma, se os alísios de NE forem mais intensos, a ZCIT tenderá a se deslocar para regiões mais ao sul. Essa observação levou alguns pesquisadores a concluir que ventos fortes "empurram" a ZCIT para fora das regiões onde eles aparecem (Namias, 1972; Hastenrath & Heller, 1977).

Entretanto, como as anomalias da tensão de cisalhamento do vento sobre a superfície do Atlântico provavelmente modificam significativamente as TSMs, não é totalmente claro qual é a anomalia - se a tensão de cisalhamento na superfície do oceano, a TSM ou, mais provavelmente, a combinação das duas - que estaria causando as posições anômalas da ZCIT.

Vários trabalhos que objetivam o estudo das anomalias de precipitação no Nordeste e no Sahel mencionam qualitativamente deslocamentos da "posição da ZCIT" em relação a estas anomalias. Essa posição da ZCIT pode ser rastreada através da posição dos vários fenômenos meteorológicos com ela relacionados, tais como o cavado equatorial e a Zona de Confluência dos Alísios (ZCA), que, embora não coincidentes exatamente com a posição da ZCIT, apresentam deslocamentos muito bem relacionados com o dela.

No entanto, sobre o oceano a determinação da posição do cavado equatorial não é simples devido à sua grande extensão latitudinal, de tal forma que medidas da pressão da superfície do mar não determinam com precisão a posição do cavado. Para considerar a posição da ZCA como a posição da ZCIT, temos de ressalvar que, apesar de o deslocamento de ambas estar muito bem relacionado, a ZCA possui uma amplitude de deslocamento maior que a ZCIT, localizando-se ao norte desta durante o verão boreal e ao sul durante o inverno.

A primeira tentativa de levantar quantitativamente os movimentos da ZCIT sobre o Atlântico Equatorial foi realizada por Citeau et alii (1985), que apresentaram uma série de posições semanais da ZCIT, ao longo de 28$^{o}$W, com base na posição média da banda de máxima cobertura de nuvens sobre o Atlântico Tropical e a relacionaram com a precipitação sobre o Sahel.

Nessa linha de estudos, este trabalho propõe-se a estudar como a posição da ZCIT, representada aqui pela latitude média da banda de nuvens convectivas sobre o Atlântico ao longo de 35$^{o}$, 40$^{o}$ e 45$^{o}$W, influencia a precipitação do Nordeste e que fenômenos determinam essa posição.

Além disto, são estudadas as relações entre a TSM e a tensão de cisalhamento superficial sobre o Atlântico e a precipitação do Nordeste, considerando como medida dessa precipitação um índice calculado com base na precipitação de 116 estações pluviométricas distribuídas pelo Nordeste.

São feitos estudos em diferentes escalas de tempo (sazonal e intra-sazonal) com o objetivo de determinar se a ZCIT é um bom precursor para a estação

chuvosa e se suas oscilações de alta freqüência (período de dezenas de dias) podem influenciar a estação chuvosa do Nordeste como um todo.

No segundo Capítulo deste trabalho são revisados trabalhos mais relevantes para este estudo. A seguir, no terceiro, são apresentadas as séries de dados utilizadas e a metodologia usada nas análises desenvolvidas neste trabalho. O quarto Capítulo apresenta os resultados obtidos. No quinto Capítulo são discutidos os resultados e apresentadas as conclusões principais.

## CAPÍTULO 2

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é um sistema que tem sido bastante estudado nas duas últimas décadas. Sua influência sobre a precipitação nos continentes africano, americano e asiático tem sido aceita e mostrada em vários trabalhos como Hastenrath & Heller (1977), Lamb (1978b), Sikka & Gadgil (1980), Moura & Shukla (1981), Chung (1982), Citeau et alii (1988a e b), e muitos outros.

Na região da ZCIT há a interação entre vários sistemas tais como a Zona de Confluência dos Alísios de SE e de NE (ZCA), o Cavado Equatorial, a zona de máxima Temperatura da Superfície do Mar (TSM), de máxima convergência e a banda de máxima cobertura de nuvens convectivas, todos interagindo sobre a faixa equatorial dos oceanos.

No princípio, a idéia que se tinha sobre a formação da ZCIT era que todos esses sistemas se encontravam sobrepostos numa mesma latitude interagindo um com o outro (Hastenrath & Lamb, 1977). Essa idéia, no entanto foi mudada por Hastenrath & Lamb (1977), Hastenrath & Heller (1977) e Estoque & Douglas (1978) que mostraram que esses sistemas não se apresentam sobre a mesma latitude em superfície, mas sim próximos uns aos outros.

Hastenrath & Lamb (1977) mostraram que, durante os meses de julho e agosto (verão no hemisfério norte), a ZCA aparece sobre o cavado equatorial de baixa pressão e as regiões de máxima cobertura de nuvens, precipitação e convergência são quase coincidentes e se

localizam a aproximadamente 3 graus ao sul da ZCA. Durante o verão do hemisfério sul nota-se que a zona de máxima cobertura, precipitação e convergência se localiza ao norte da ZCA.

Pike (1971) usando um modelo de equações primitivas encontrou que a localização da ZCIT é influenciada pelo perfil norte-sul da TSM e que a zona de máxima cobertura se localiza sobre ou muito próxima à área de temperatura máxima. Esse resultado foi confirmado pelas análises observacionais e modelos numéricos de Hastenrath & Lamb (1977), Moura & Shukla (1981) e Saha (1981) que afirmaram que a região de máxima TSM se caracteriza por ser uma faixa larga com fracos gradientes e que toda a estrutura da ZCIT se encontra sobre ela.

É fato, no entanto, que todo o conjunto de sistemas que integram a ZCIT (banda de máxima convecção, cavado equatorial, ZCA e máxima TSM) possue um deslocamento conjunto meridional ao longo do ano e que autores diferentes escolhem variáveis diferentes para representar a ZCIT em seus estudos, de acordo com os dados que utilizam. Por exemplo, Hastenrath (1978 e 1984), Hastenrath & Lamb (1977), Hastenrath & Heller (1977) e Hastenrath et alii (1984) consideram o cavado equatorial como representativo da ZCIT. Por outro lado, Estoque & Douglas (1978), Chung (1978) e Servain & Seva (1987) consideram a posição da ZCA enquanto que Citeau et alii (1985, 1988a e 1988b) e o presente trabalho consideram a banda de máxima cobertura de nuvens como representativa da ZCIT. De fato, dependendo do tipo de dado usado para o estudo, pode-se escolher a melhor variável para representar a ZCIT e, em geral, os resultados são bastante semelhantes quando se estuda fatos ligados ao deslocamento da ZCIT, pois os deslocamentos dos sistemas integrantes da ZCIT possuem uma alta correlação entre si.

Estudando o campo de TSM próximo à ZCIT, Hastenrath & Lamb (1977) notaram que, durante o verão boreal, imediatamente ao sul do Equador aparece uma faixa de águas frias seguida de um pronunciado aumento de temperatura em direção ao norte. Uma faixa de máximas TSMs estende-se, então, entre $5^{o}$ e $14^{o}N$, com a temperatura máxima acontecendo em torno de $12^{o}N$. Essa faixa de águas frias irá influenciar a estrutura vertical da ZCIT, como veremos a seguir.

Analisando a estrutura vertical da ZCIT, Estoque & Douglas (1978) observaram que esta varia de acordo com a região do cinturão equatorial em que se encontra. Sobre o Oceano Atlântico, Hastenrath & Lamb (1977) observaram que, durante o verão do hemisfério norte, a ZCA apresenta uma inclinação para o sul (região onde se encontram TSMs mais frias) com a altura. Esta inclinação para o sul da ZCA explica o fato da banda de máxima convecção se encontrar ao sul da ZCA pois ela estaria sob a região de movimento ascendente máximo no topo da camada limite e não sobre a posição da ZCA em superfície.

Considerando-se a marcha anual da ZCIT, observa-se que esta apresenta um deslocamento norte-sul oscilando com um período da ordem de um ano, com posições mais ao norte (aproximadamente $8^{o}N$) durante o verão boreal e mais ao sul ($1^{o}N$) durante o verão austral (Hastenrath & Heller, 1977 e Citeau et alii, 1988a e 1988b), além de outras oscilações também norte-sul, porém de menor período. Goswami & Shukla (1984), usando um modelo simétrico, encontraram nos trópicos, duas oscilações predominantes associadas à ZCIT com altas freqüências, uma com período entre 10 e 20 dias e outra com período entre 30 e 50 dias. Também puderam ser observadas oscilações de escala semanais através do monitoramento diário da posição da ZCIT publicada mensalmente no boletim Climanálise.

Hastenrath & Heller (1977) afirmam que a marcha das estações no Nordeste é dominada pela migração latitudinal do cavado equatorial e da ZCA sobre o Oceano Atlântico e que a estação chuvosa desta região está ligada às posições mais ao sul que o cavado equatorial e a ZCA atingem durante os meses de março e abril.

Rao & Marques (1984) afirmam que a variação no fluxo de umidadde sobre o Nordeste, associado à convergência em baixos níveis sugerem que o mecanismo gerador de precipitação sobre o Nordeste está conectado à ZCIT.

Moura & Shukla (1981), Markham & McLain (1977), Hastenrath et alii (1984) e Hastenrath (1984) estudaram as correlações entre as anomalias de TSM sobre o Atlântico Tropical e a precipitação sobre o Nordeste e concluíram que anomalias positivas de TSM sobre o Atlântico Tropical sul e negativas sobre o Atlântico Tropical Norte geram maior precipitação sobre o Nordeste e a situação inversa gera anos de seca. Como a formação desse quadro de temperaturas acontece alguns meses antes do início da estação chuvosa, concluíram que as anomalias de TSM poderiam ser usadas como um elemento precursor para se estimar a qualidade da estação chuvosa do Nordeste

Chung (1982), Hastenrath et alii (1984) e Servain & Seva (1987) analisaram as correlações entre a intensidade das altas pressões de superfície dos Atlânticos Tropicais Norte e Sul, e conseqüentemente dos alísios sobre o Atlântico Tropical e a precipitação no Nordeste, observando que em anos de seca existe um aumento na intensidade do anticiclone do Atlântico Tropical Sul, e um enfraquecimento no do Atlântico Tropical Norte, resultando em alísios de SE mais fortes, e de NE mais fracos, o que

desloca para o norte a posição da ZCA. Notaram também que a precipitação sobre o Nordeste é bastante sensível a essa variação na posição da ZCA. Oliveira (1982), analisando cartas semestrais de quantidade de nebulosidade (cartas de brilho) para 1 ano seco e 1 ano chuvoso, encontrou a mesma relação entre os alísios e a precipitação no Nordeste.

Rao & Marques (1984) mostraram que a variação de direção no fluxo de umidade sobre o Nordeste, associado à convergência em baixos níveis sugere que o mecanismo produtor de precipitação está conectado com a ZCIT.

Hastenrath et alii (1984), procurando um método de previsão para anos secos e chuvosos no Nordeste, concluíram que os melhores preditores para a "qualidade da estação chuvosa" são os campos de circulação oceânico e atmosférico de grande escala e que uma previsão através desses campos poderia ser feita com até 6 meses de antecedência. O termo "qualidade da estação chuvosa" é aqui usado para indicar qualitativamente anomalias positivas (qualidade "boa") ou anomalias negativas (qualidade "má") de precipitação.

Em concordância com Hastenrath et alii (1984), NOBRE et alii (1984) encontraram alta correlação entre a precipitação do Nordeste e padrões de teleconexão da circulação atmosférica no hemisfério norte. Esses padrões, caso se estabeleçam, precedem a estação chuvosa em 1 a 3 meses, de tal forma que podem ser usados como elemento precursor para se estimar a qualidade da estação chuvosa.

Em linhas gerais, as conclusões de Hastenrath & Heller (1977), Hastenrath & Lamb (1977), Markham & McLain (1977), Moura & Shukla (1981), Chung

(1982), Oliveira (1982), Hastenrath et alii (1984), Hastenrath (1984) e Servain & Seva (1987) é que um ano chuvoso está ligado ao fato da ZCIT se deslocar para posições mais ao sul que o normal durante o verão no hemisfério sul e um ano seco ao fato da ZCIT manter-se em posições mais ao norte que o normal durante no mesmo período.

Essas conclusões diferem ligeiramente do encontrado por Citeau et alii (1988a) que, analisando o deslocamento anual da ZCIT através da posição média da ZCIT para 3 anos secos e 3 anos chuvosos para o Sahel, considerando a banda de máxima convecção como representativa da posição da ZCIT, observou que, para o Sahel, anos chuvosos estão relacionados à permanência por mais tempo da ZCIT em suas posições mais ao sul e anos secos ao retorno antecipado da ZCIT para suas posições mais ao norte.

# CAPÍTULO 3

# DADOS E METODOLOGIA

Neste capítulo serão descritas as séries de dados utilizadas.

## 3.1 - DADOS DE TENSÃO DE CISALHAMENTO DO VENTO E TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DO MAR.

Foram utilizados os dados de Tensão de Cisalhamento Superficial Zonal (TAUX) e Meridional (TAUY) e dados da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) provenientes de Picaut et alii (1981) e Servain et alii (1987).

Esses dados consistem em uma série de médias mensais de TAUX, TAUY e TSM de 1964 a 1985, numa área sobre o Oceano Atlântico compreendida entre $20^{o}S$, $30^{o}N$ e $60^{o}W$ e a costa oeste da África, gradeada num espaçamento de $2^{o}$ X $2^{o}$, mostrada na Figura 3.1.

## 3.2 - DADOS DE PRECIPITAÇÃO SOBRE O NORDESTE

A princípio, a precipitação sobre o Nordeste foi representada por três séries de índices de precipitação padronizados, das quais uma é a série de índices sazonais de Hastenrath (1986) (PNEHs) e as outras são as séries anual e semestral de Nobre & Paião (1986) (PNENPa e PNENPs, respectivamente).

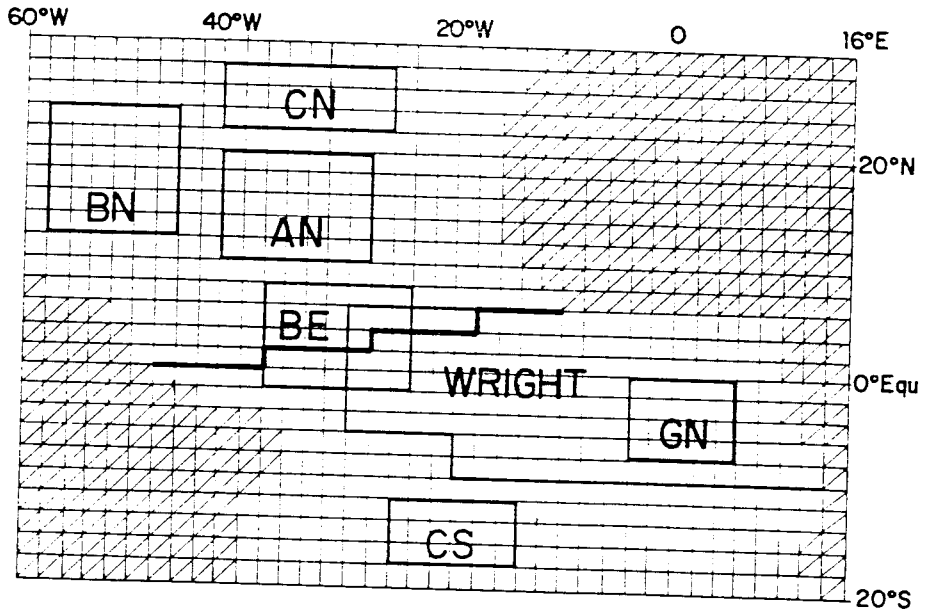



Fig. 3.1 - Região de estudo.

- As áreas BN, CN, AN, GN, CS, BE e WRIGHT foram selecionadas para o cálculo da persistência de TSM. A linha mais forte entre a América do Sul e a África representa aproximadamente a posição média da ZCIT determinada por Hastenrath e Heller (1977)

Os três índices foram calculados como a média espacial, para um certo número de estações pluviométricas, da diferença entre a precipitação observada e a precipitação média para cada estação pluviométrica, dividida pelo desvio padrão desta estação para um período de tempo que pode ser mensal, sazonal ou anual. Tal índice é expresso da seguinte maneira:

$$IP_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N} \frac{(P_{i,j} - P_i)}{\sigma_j} ,$$

onde:

$IP_i$ = índice de precipitação para o período i (ano ou meses);

$P_{i,j}$ = total de precipitação nos meses considerados durante o período i na estação pluviométrica j;

$P_j$ = precipitação média na estação pluviométrica j;

$\sigma_j$ = desvio padrão para a estação pluviométrica j;

N = número de estações pluviométricas que compõem o índice.

As diferenças básicas entre os índices utilizados são descritas a seguir.

Hastenrath (1986) gerou uma série de índices sazonais considerando, para tanto, a precipitação dos meses de março a maio, de 1913 a 1985, de 30 estações do Nordeste.

Nobre & Paião (1986) geraram duas séries diferentes. A primeira, sazonal, a partir da precipitação nos meses de fevereiro a maio, de 1912 a 1983 para 116 estações do Nordeste. A segunda, anual, a partir da precipitação de setembro a agosto das mesmas estações no mesmo período.

As duas séries de índices sazonais (PNEHs e PNENPs) se mostraram muito bem correlacionadas, com um coeficiente de correlação de 0,97 em 71 anos de dados (1913 - 1983). Os valores dos índices utilizados neste trabalho (1964 a 1983) são apresentados na Tabela 3.1.

Neste trabalho foram ainda calculados os índices mensais de precipitação para o Nordeste como um todo (PNETm), para o interior dessa região (PNEIm) e para a

região litorânea (PNELm). Foram consideradas como litorâneas as estações a menos de 45 km do litoral. A Figura 3.2 mostra a distribuição das estações usadas para o cálculo dos índices mensais, que são as mesmas utilizadas por Nobre & Paião (1986). As estações representadas por um círculo foram consideradas como interioranas e as representadas por um quadrado, como litorâneas.

TABELA 3.1

SÉRIES DE VALORES DOS ÍNDICES DE HASTENRATH (1986) E NOBRE E PAIÃO (1986) ANUAL E SAZONAL.

| ANO | HASTENRATH | NOBRE e PAIÃO sazonal | NOBRE e PAIÃO anual |
|---|---|---|---|
| 1964 | 0,7489 | 1,2740 | 1,6358 |
| 1965 | 0,8241 | 0,3058 | 0,3096 |
| 1966 | -0,7840 | -0,4032 | -0,2118 |
| 1967 | 0,9912 | 1,1038 | 0,7400 |
| 1968 | 0,6968 | 0,3077 | 0,2801 |
| 1969 | 0,0223 | 0,1445 | 0,2537 |
| 1970 | -0,4269 | -0,8022 | -0,6558 |
| 1971 | 0,4098 | 0,3627 | 0,4002 |
| 1972 | -0,4855 | -0,3993 | -0,2569 |
| 1973 | 0,6058 | 0,5651 | 0,7437 |
| 1974 | 1,5749 | 1,8806 | 1,8212 |
| 1975 | 0,4358 | 0,3922 | 0,7107 |
| 1976 | -0,2237 | -0,1980 | -0,4421 |
| 1977 | 0,4998 | 0,2644 | 0,7353 |
| 1978 | -0,2819 | 0,0354 | 0,3159 |
| 1979 | -0,6149 | -0,4441 | -0,4469 |
| 1980 | -0,9532 | -0,3762 | -0,1385 |
| 1981 | 0,2036 | -0,5518 | -0,5130 |
| 1982 | -0,3580 | - | - |
| 1983 | -0,9206 | - | - |
| 1984 | 1,0464 | - | - |
| 1985 | 2,0060 | - | - |

Para o cálculo desses índices foi usado o mesmo método de Hastenrath (1986) e de Nobre & Paião (1986); para o cálculo do índice da região toda, do interior e das regiões litorâneas foram consideradas 116, 104 e 12 estações, respectivamente.

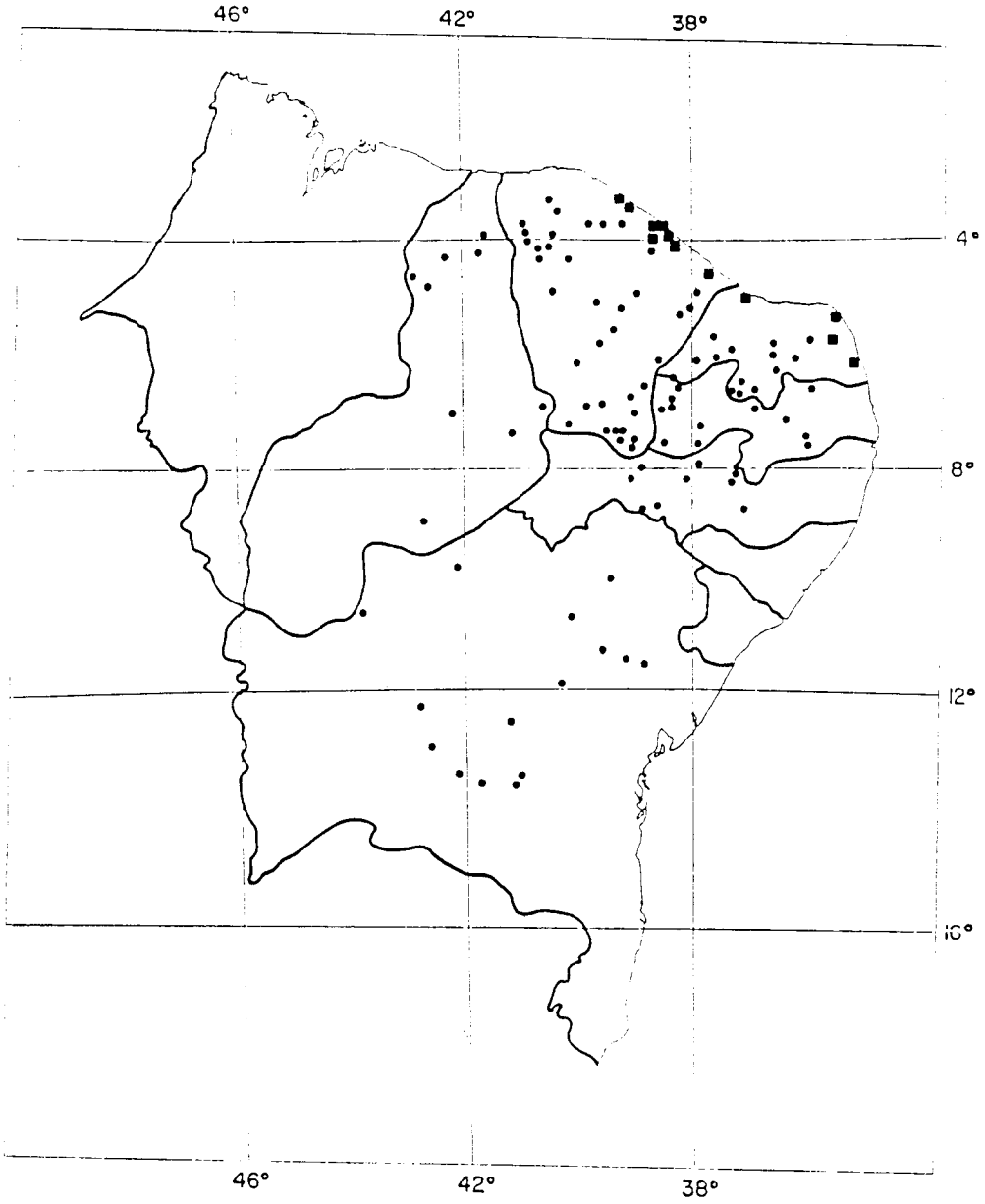



Fig. 3.2 - Distribuição das estações pluviométricas sobre o Nordeste do Brasil.

- As estações representadas por círculos são consideradas interioranas e as representadas por um quadrado são litorâneas.

## 3.3 - DADOS DA POSIÇÃO DA ZONA DE CONVERGÊNCIA INTERTROPICAL (ZCIT)

Como indicadoras da posição da ZCIT, foram consideradas quatro séries de dados.

A primeira, de Citeau et alii (1988b), é composta pelas posições médias semanais (cada mês com 4 semanas) da posição da ZCIT ao longo do meridiano de 28°W de 1971 a 1987. Nesta série, a posição da ZCIT é determinada pela latitude da posição média da banda de máxima cobertura convectiva sobre o Atlântico Equatorial.

As outras três séries foram determinadas considerando a posição média da ZCIT para 5 dias ao longo de 35°, 40° e 45°W, de 1971 a 1987. Foram escolhidas essas longitudes devido à sua proximidade ao Nordeste.

Para determinar essas séries foram usadas três diferentes fontes de dados, a saber:

a) de 1971 a 1984, excetuando abril a dezembro de 1978, foram analisadas imagens diárias no canal do infravermelho (IV) termal de satélites da série NOAA;

b) de abril a dezembro de 1978, foram analisadas imagens no canal IV termal do satélite METEOSAT;

c) de 1985 a 1987, a posição da ZCIT foi determinada a partir de imagens digitais síntese de 5 dias do satélite METEOSAT.

Nos casos (a) e (b), a posição da ZCIT foi determinada subjetivamente, a partir da análise de cada imagem, considerando a posição da ZCIT como a latitude

média da banda de nuvens convectivas sobre o Atlântico Tropical. Em caso de ausência de banda de nuvens, o que impossibilita a determinação da posição da ZCIT, o valor 999 foi associado à posição da ZCIT, o mesmo acontecendo em dias de dados faltosos.

A determinação da posição da ZCIT era feita, em geral, quando a banda de nuvens não excedia $10^{o}$ de largura, principalmente se próximo ao continente, de forma a diminuir o erro. No centro do oceano, a determinação da posição da ZCIT era mais simples, pois a banda nebulosa, em geral, é bem melhor definida, o que facilita, a localização de sua posição média.

Após determinadas as posições diárias, foi calculada a posição média da ZCIT a cada cinco dias (pêntada). Calcularam-se médias a cada 5 dias com o objetivo de eliminar as oscilações de curto prazo da ZCIT e diminuir o erro associado à subjetividade do método. Para simplificar as operações computacionais, o mês foi dividido em seis pêntadas, de tal forma que a última pêntada do mês pode conter de 3 a 6 dias, de acordo com o número de dias do mês.

Nas pêntadas com dados faltosos ou dias em que não foi possível determinar a posição da ZCIT (999), a posição média foi calculada com base nos dados existentes, de tal forma que o número de dados utilizados para calcular essas médias pôde variar de 1 a 4. As pêntadas que não possuiam qualquer dado ,isto é, cinco vezes o valor 999, receberam como valor médio o próprio valor 999 que indica a ausência de dados.

Para o caso (c) usou-se uma metodologia diferente na determinação da posição da ZCIT. A posição era determinada a partir de uma imagem síntese de 5 dias,

gerada utilizando 8 imagens diárias no canal IV termal do METEOSAT durante cinco dias. Na criação da imagem síntese é retida em cada "pixel" apenas a temperatura mais alta do período, de tal forma que na imagem final a ZCIT aparecerá onde as células convectivas com topos de baixas temperaturas se mantiveram presentes durante todo o período. O objetivo desse método de geração é filtrar as oscilações de curto prazo da ZCIT existentes no período.

A imagem digital síntese de 5 dias era então tratada usando o conjunto de programas de tratamento de imagens de satélite instalado na Unidade de Tratamento de Imagens de Satélites (UTIS) do Centro de Pesquisas Oceanográficas de Dakar-Thiaroye (CRODT). O resultado final desse tratamento é uma imagem com dados de temperatura que abrangem a área entre $20^{o}N$, $20^{o}S$ e $10^{o}W$, $50^{o}W$, numa projeção geométrica que contém uma grade de latitudes de grau em grau, com as longitudes de $35^{o}W$, $40^{o}W$ e $45^{o}W$ evidenciadas, apresentando o contorno dos continentes existentes na área. A apresentação dessa imagem era feita num monitor de vídeo colorido e a posição da ZCIT sobre $35^{o}W$, $40^{o}W$ e $45^{o}W$ era determinada como a latitude média da região de máxima atividade convectiva permanente durante os cinco dias considerados para a pêntada; desta forma obteve-se, diretamente a posição sobre a qual a ZCIT permaneceu em média durante a pêntada.

Neste caso, o erro na determinação da posição da ZCIT diminui, pois a banda de baixas temperaturas, relativas aos topos de nuvens convectivas, se torna mais estreita (em geral com espessura não maior que $5^{o}$).

A determinação da posição da ZCIT mostrou-se mais difícil ao longo de $45^{o}W$ devido à proximidade do

continente, pois a convecção proveniente deste prejudica ou até mesmo impossibilita a determinação da posição.

Devido a essa interferência da convecção vinda do continente, nota-se que a série de posições da ZCIT ao longo de 45°W possui maior quantidade de pêntadas sem dados, seguida pela série ao longo de 40°W. Comparativamente, a série em 45°W possui um número de pêntadas sem dados 88% maior que a série ao longo de 35°W e a série em 40°W, 17% maior que a em 35°W.

Essas três séries de posição da ZCIT (ao longo de 30°W, 40°W e 45°W, de 1971 a 1987) foram submetidas à análise espectral para observação das oscilações de alta freqüência a que estão sujeitas.

Uma série contendo a posição latitudinal média mensal da Zona de Confluência dos alísios sobre 30°W de 1971 a 1985 foi também gerada para este trabalho (Fig. 3.3) e é comparada com a série de posições da ZCIT, ao longo de 28°W, determinada por Citeau et alii (1988b) e com os índices de precipitação sazonal de Hastenrath (1986). Esta série de posições da ZCA foi determinada a partir dos dados de tensão de cisalhamento meridional de Picaut et alii (1981) e Servain et alii (1987).

A posição da Zona de Confluência foi definida como a latitude na qual o vento meridional inverte seu sentido, isto é, velocidade do vento meridional igual a zero. Como os dados estão numa grade cujo espaçamento latitudinal é de dois graus, o erro máximo associado com a determinação destas latitudes é da ordem de 2 graus de latitude.

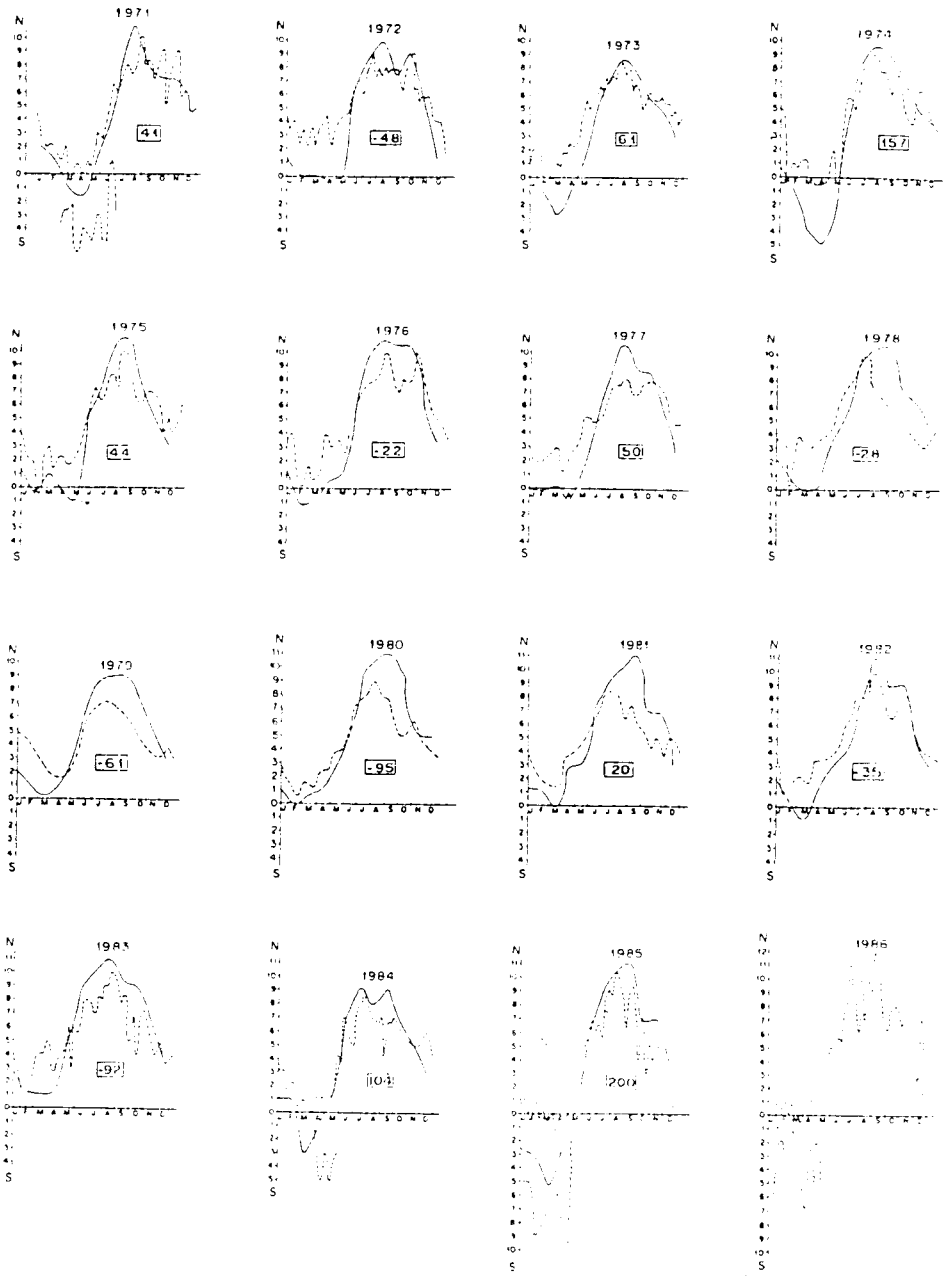



Fig. 3.3 - Série da posição da ZCA.

- Comparação entre a marcha anual da ZCA ao longo de 30 (linha cheia) e a posicão da ZCIT ao longo de 28$^{o}$W (tracejado) determinada por Citeau et alii (1988). Nos quadrados encontram-se os índices de precipitação de Hatenrath (1986).

Correlacionando a série de posição da ZCA com as 3 séries de posição da ZCIT (considerando médias mensais), obteve-se, para 204 dados a correlação de 0,95 entre a ZCIT em 35$^{o}$W e a ZCA, 0,94 entre a ZCIT em 40$^{o}$W e a ZCA e 0,93 entre a ZCIT em 45$^{o}$W e a ZCA.

Esses resultados mostram que os erros introduzidos pela análise subjetiva nas determinações das posições não foram suficientemente grandes para descaracterizar a série de dados, pois os métodos de determinação da série da ZCA e das séries da ZCIT são completamente independentes.

# CAPÍTULO 4

# RESULTADOS

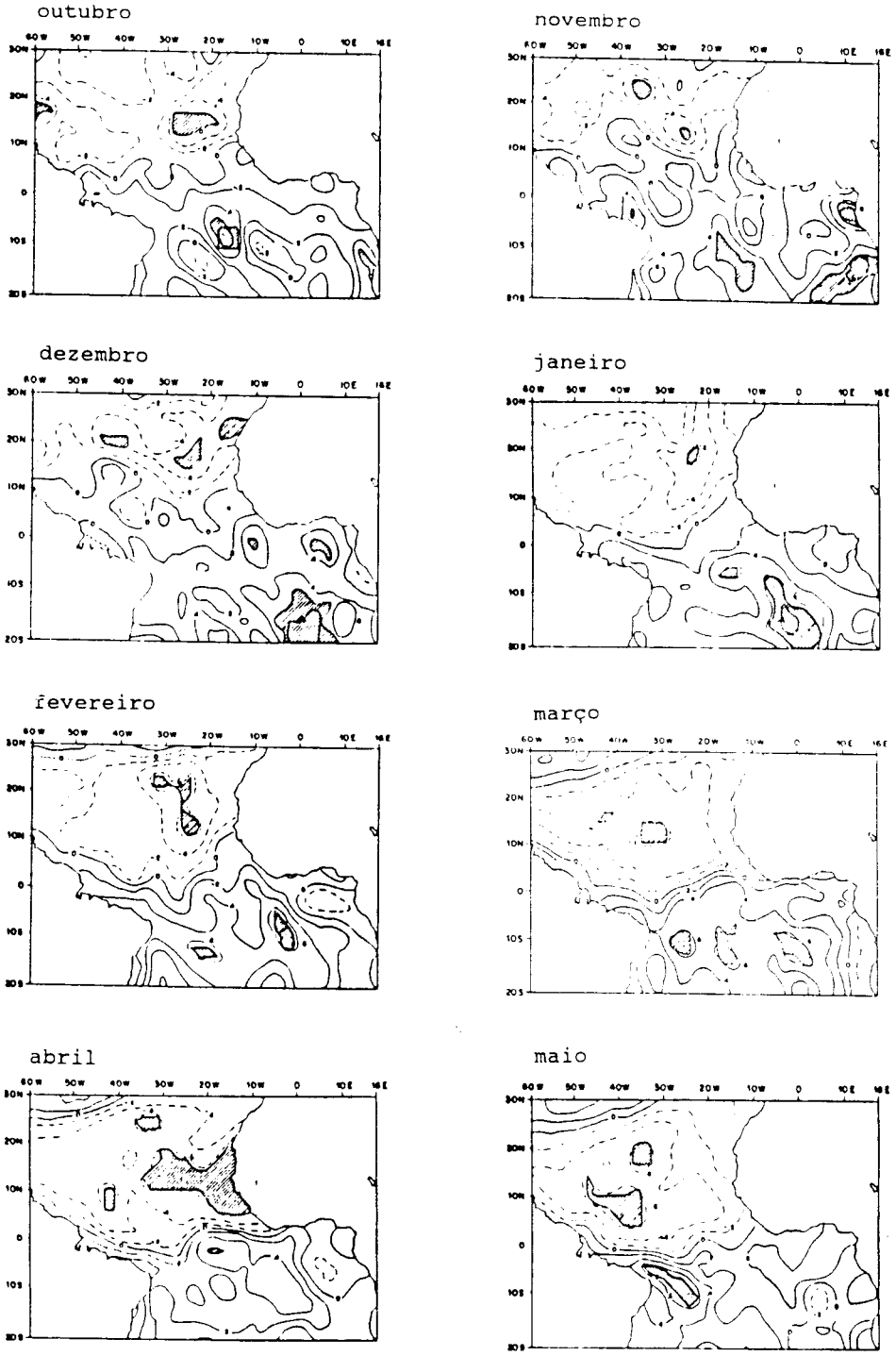
## 4.1 - TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DO MAR

As primeiras análises feitas consistiram em calcular os coeficientes de correlação entre os índices de precipitação para o Nordeste e os campos de anomalias de TSM, TAUX e TAUY, para cada ponto de grade da área de estudo no Atlântico Tropical, para meses que antecedem e durante a estação chuvosa (outubro a maio).

De um modo geral, nessas análises foram observados coeficientes de correlação acima de 0,6 (em módulo), principalmente para correlações entre a precipitação sobre a região norte do nordeste do Brasil (PNE) e as anomalias de TSM com grandes áreas com significância estatística acima de 95% (Fig. 4.1). A significância estatística foi calculada através da hipótese de que os coeficientes de correlação possuem uma distribuição aleatória segundo a distribuição de Student.

Pôde ser observado também que o comportamento das correlações para cada índice de precipitação usado (PNEHs e PNENPs) foi bastante semelhante, com as áreas de máxima significância aparecendo concentradas aproximadamente nas mesmas regiões.

Os mapas de isolinhas de correlação entre PNE e anomalias de TSM apresentaram, durante todos os meses estudados (outubro a maio), um padrão de bipolaridade com valores negativos de correlação na parte norte do Atlântico Tropical e valores positivos sobre a porção sul (as cartas de isolinhas de correlação são apresentadas na Figura 4.1).

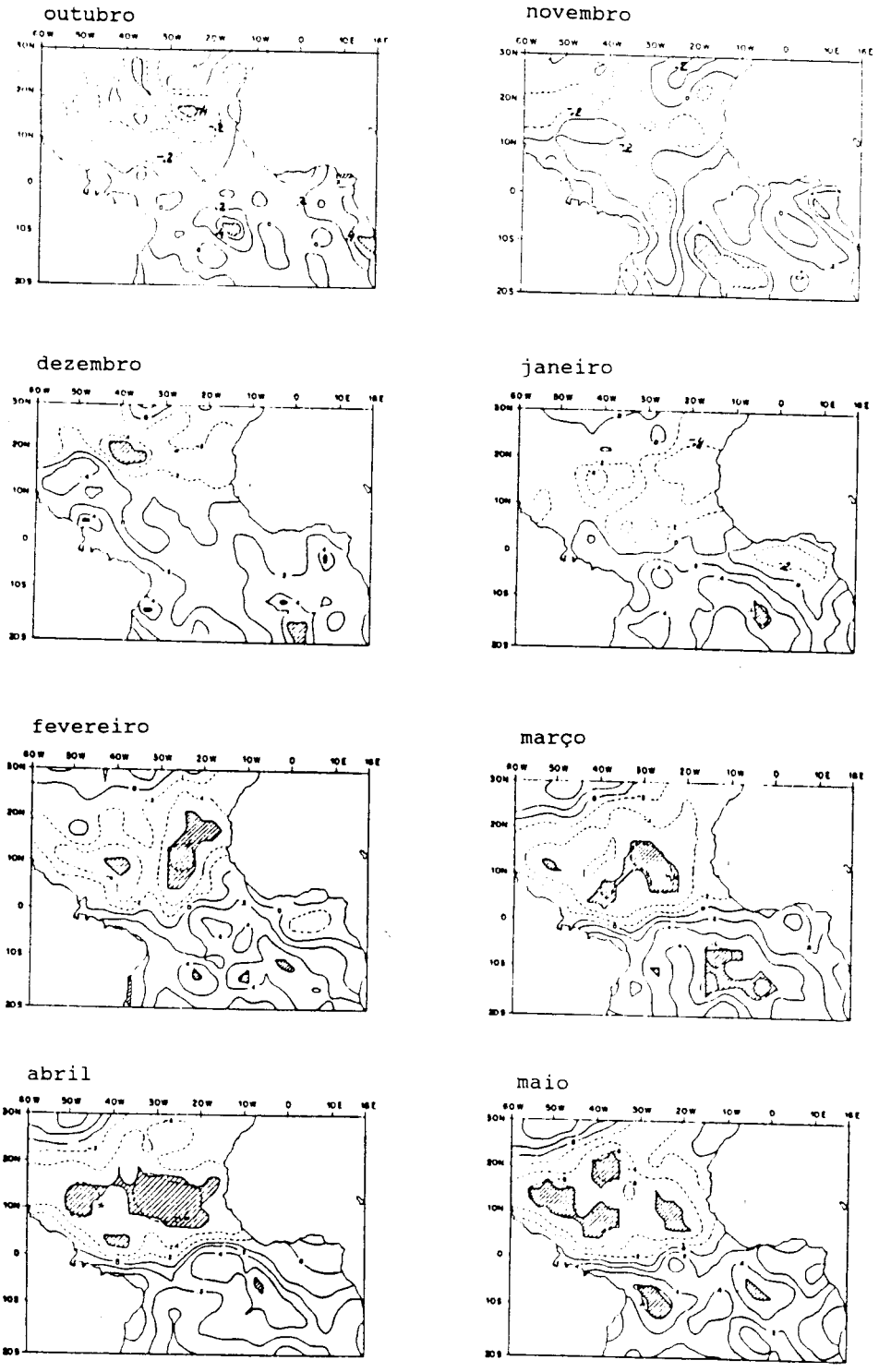



a) índice de precipitação de Nobre & Paião (1986)

(continua)

Fig. 4.1 - Isolinhas de correlação entre a precipitação do Nordeste e temperatura da superficie do mar.

- São considerados os meses de outubro a maio. As isolinhas possuem valores de 0,2 em 0,2. As áreas hachuriadas possuem significância estatística acima de 95%.




b) índice de precipitação de Hastenrath (1986)

Fig. 4.1 - Conclusão.

Esse padrão indica que quanto mais positivas (negativas) as anomalias de TSM sobre o Atlântico Tropical Sul e quanto mais negativas (positivas) sobre o Atlântico Tropical Norte, maior (menor) será a precipitação na estação chuvosa do Nordeste. Este resultado está de acordo com Hastenrath & Heller (1977) e Moura & Shukla (1981), entre outros.

Foi interessante notar que a linha de correlação zero que separa as duas áreas de sinais opostos de correlação apresenta, de outubro a maio, um deslocamento em direção ao sul, como o deslocamento apresentado pela ZCIT, tornando-se, a partir de janeiro, menos ondulada e aproximadamente paralela ao equador.

Observando as áreas com significância estatística acima de 95%, notou-se que a maior parte delas surgiu no Atlântico Sul (correlação positiva) de outubro a janeiro. A partir de fevereiro essa situação se inverteu, aparecendo no Atlântico Tropical Norte (região de correlações negativas) a maior parte das áreas com significância estatística acima de 95%. Esta observação indica que até o mês de janeiro a TSM do Atlântico Tropical Sul seria, em princípio, um melhor preditor para a precipitação no Nordeste e, a partir de fevereiro, a TSM do Atlântico Tropical Norte teria maior influência sobre a PNE. Entretanto, estes resultados devem ser vistos com cautela, pois a densidade observacional no Atlântico Sul é bem inferior àquela no Atlântico Norte.

Na seqüência de mapas de correlação entre PNE e anomalias de TSM observou-se também o mesmo fenômeno apresentado por Markham & McLain (1977), que é representado aqui por uma área de significância estatística acima de 95%, que aparece no Atlântico Sul próxima à costa da África no mês de novembro, intensifica-se em dezembro, move-se para oeste de janeiro a março e desaparece em abril (Fig.

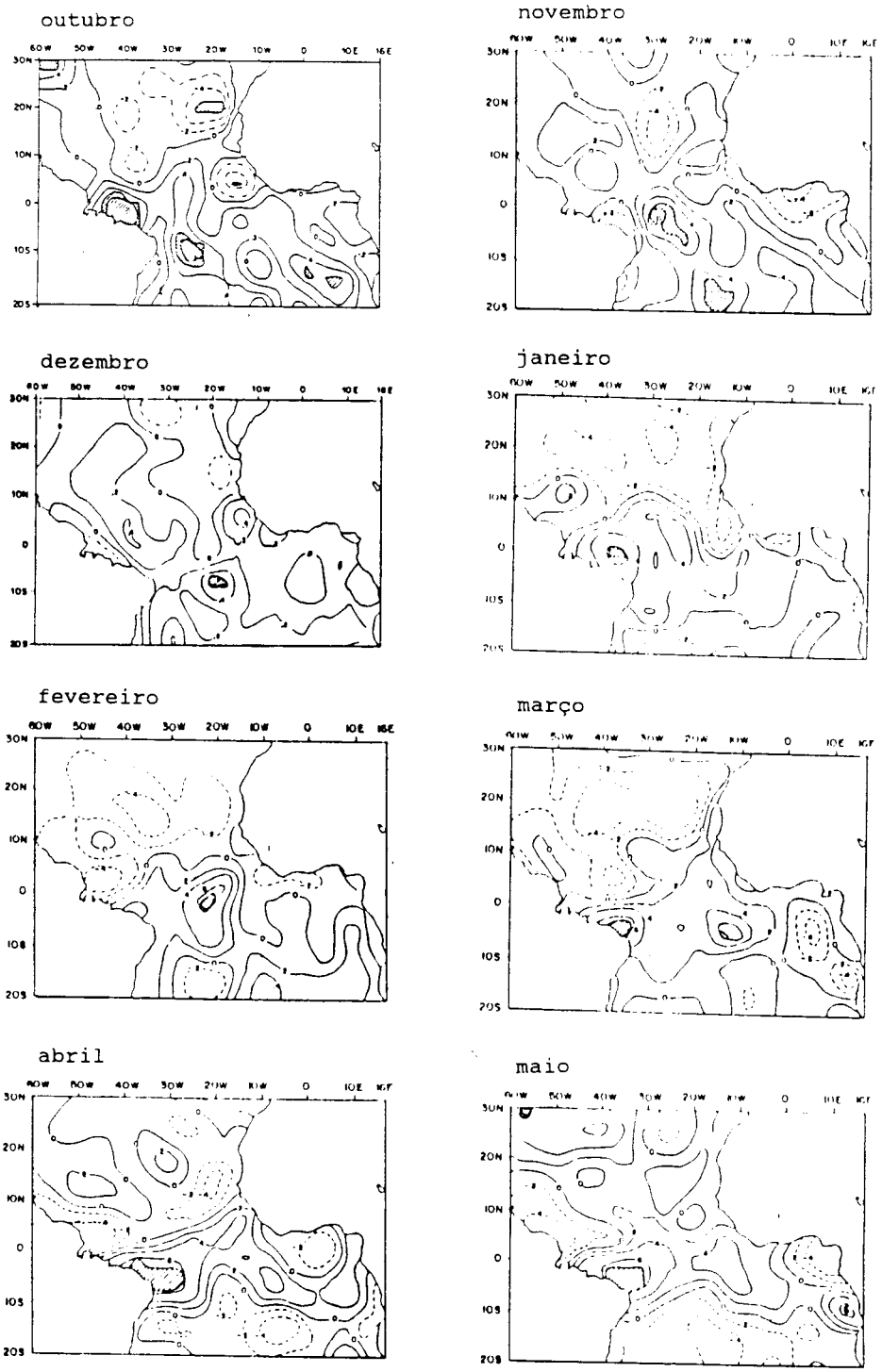
4.1). Markham & McLain (1977) associaram esse fenômeno ao deslocamento para oeste das águas quentes da Corrente Sul Equatorial.

O Golfo da Guiné, que é uma região onde o fenômeno de ressurgência é intenso, apresentou uma variação bastante grande no coeficiente de correlação durante o período estudado. Nos meses de novembro e dezembro apareceram altos índices de correlação positiva com significância estatística de até 99%; a partir de janeiro os índices começaram a diminuir, atingindo valores negativos em fevereiro e voltando a coeficientes positivos, porém próximos de zero, depois de abril (Fig. 4.1).

## 4.2 - TENSÃO DE CISALHAMENTO SUPERFICIAL ZONAL (TAUX)

Na análise dos coeficientes de correlação entre PNE e anomalias de TAUX notou-se que, principalmente a partir de dezembro, quando um padrão melhor definido de correlações começa a aparecer, o comportamento em relação aos dois índices de precipitação (PNEHs e PNENPs) se torna muito parecido (Fig. 4.2).

A partir de janeiro desenvolve-se um padrão bipolar de correlações com valores positivos de correlação na parte sul do Atlântico Tropical e negativos na parte norte, isto é, componente zonal dos alísios de NE (SE) mais forte (fraca), estação chuvosa com maior (menor) precipitação. Em abril e maio as latitudes mais altas do Atlântico Tropical (tanto ao norte quanto ao sul) também começam a apresentar correlações negativas, mantendo-se então apenas a região próxima ao equador com índices positivos de correlação.

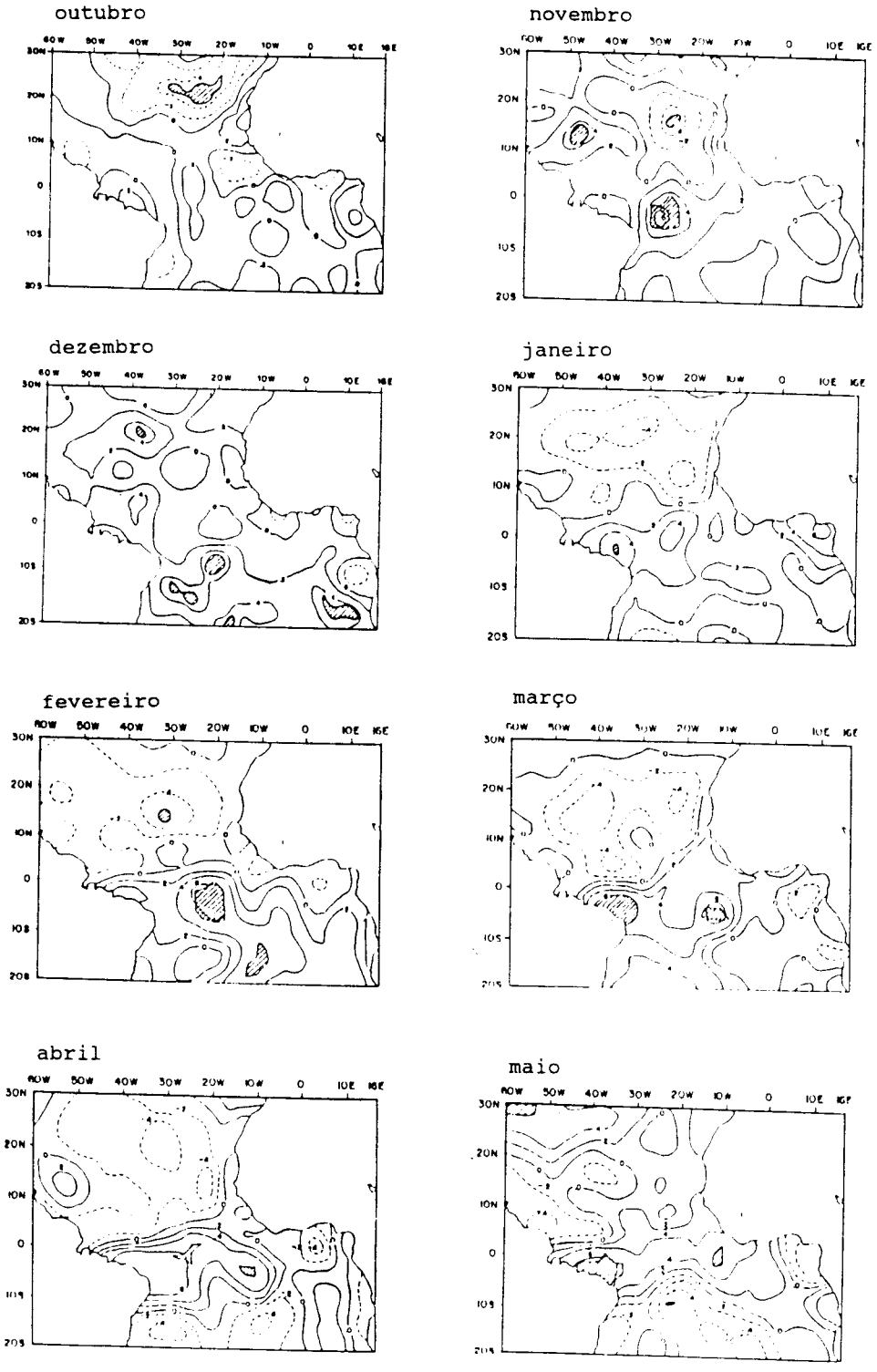



a) índice de precipitação de Nobre & Paião (1986)

(continua)

Fig. 4.2 - Isolinhas de correlação entre a precipitação do Nordeste e tensão de cisalhamento superficial zonal.

- São considerados os meses de outubro a maio. As isolinhas possuem valores de 0,2 em 0,2. As áreas hachuriadas possuem significância estatística acima de 95%.




b) índice de precipitação de Hastenrath (1986)

Fig. 4.2 - Conclusão.

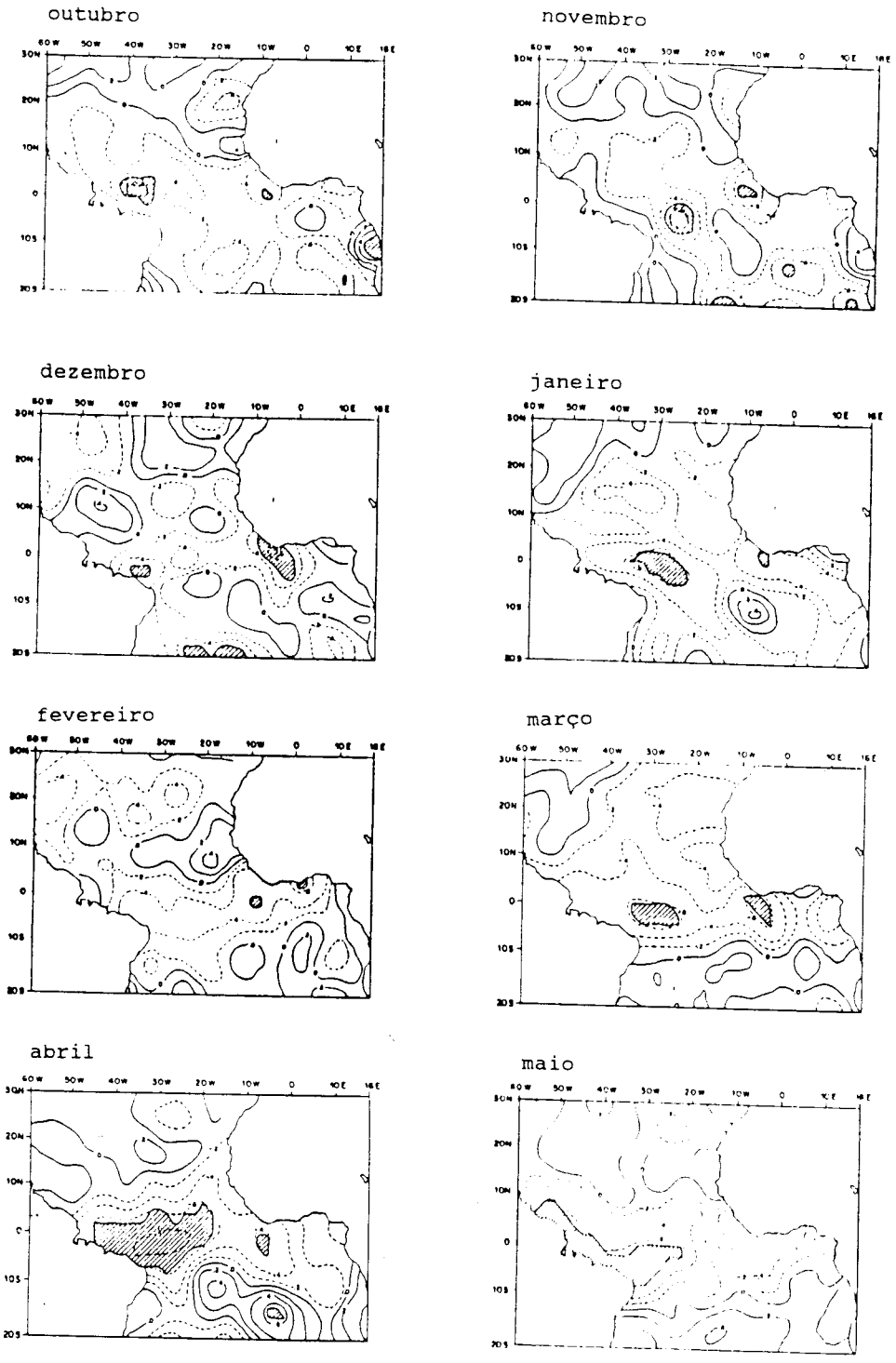
Essa faixa de índices positivos estende-se de aproximadamente $0^{o}$ a $10^{o}N$ e é onde aparecem, durante todo o período, as mais altas correlações positivas (acima de 0,58) e de significância estatística (acima de 95%), o que indica que, de uma maneira geral, quanto mais fracos forem os alísios nessa faixa, mais intensa será a estação chuvosa sobre o Nordeste.

Nos meses de janeiro a março, o padrão de dipolo é o mais característico, o que significa que para anos chuvosos (secos) os alísios de NE estão mais fortes (fracos) enquanto os alísios de SE estão mais fracos (fortes). Esses resultados foram também encontradas por Buchmann (1981) usando um modelo de equações primitivas de duas camadas.

Os resultados encontrados através da análise de correlações mostraram-se bastante coerentes com a análise da circulação tropical feita por Chung (1982) e Hastenrath et alii (1984), onde se coloca que o aumento da precipitação no Nordeste está ligado ao enfraquecimento da Alta do Atlântico Sul (e, portanto, dos alísios de SE) e ao fortalecimento da Alta do Atlântico Norte (e, portanto, dos alísios de NE).

## 4.3 - TENSÃO DE CISALHAMENTO SUPERFICIAL MERIDIONAL (TAUY)

Os mapas de isolinhas de correlação entre PNE e anomalias de TAUY (Fig. 4.3) apresentaram, também, um comportamento bastante semelhante para os dois índices de precipitação usados. Durante todo o período estudado predominam as correlações negativas, o que indica que o fortalecimento da componente meridional dos alísios de NE e o enfraquecimento dos alísios de SE estão relacionadas com a maior precipitação no Nordeste.

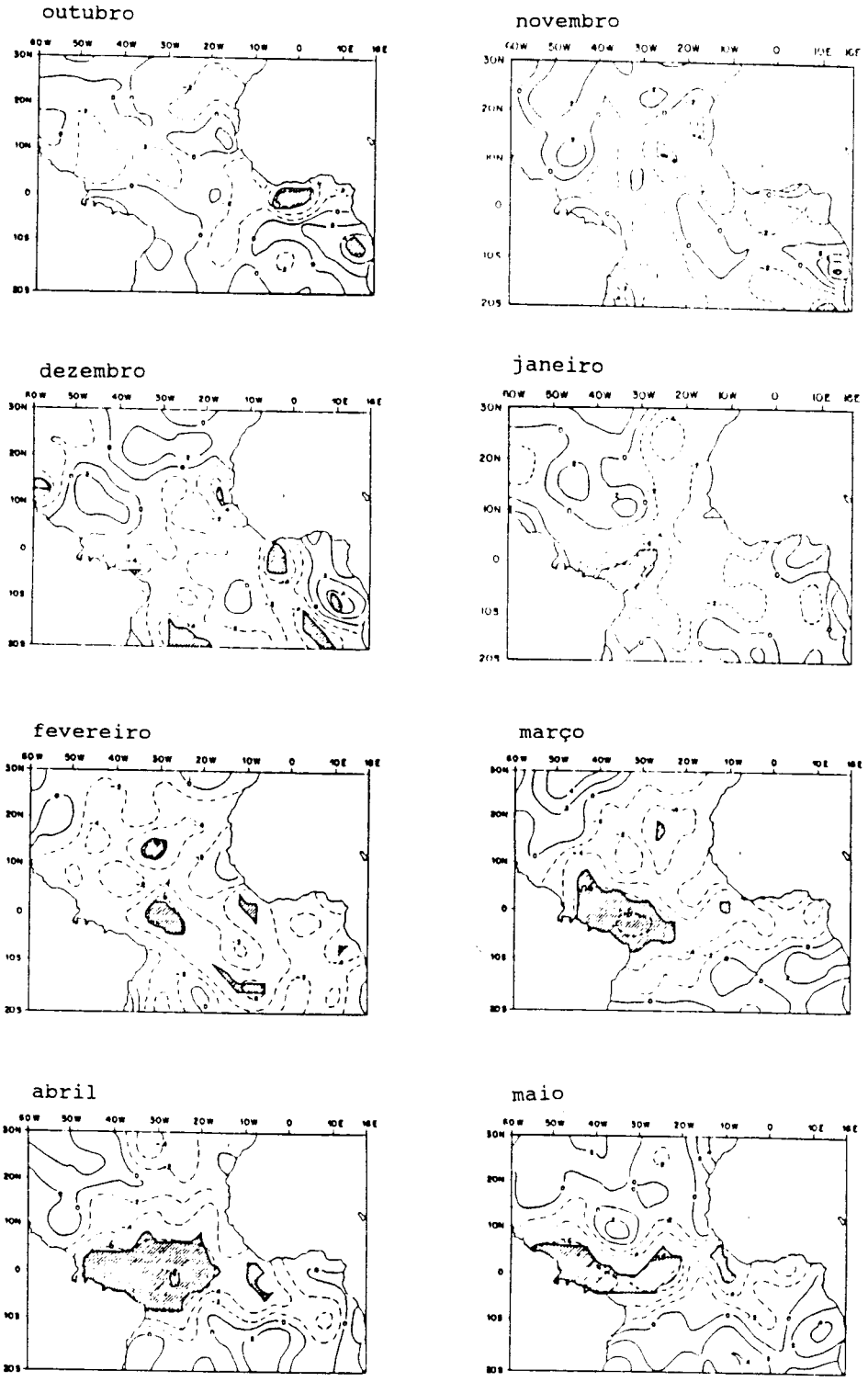



a) índice de precipitação de Nobre & Paião (1986)

(continua)

Fig. 4.3 - Isolinhas de correlação entre a precipitação do Nordeste e a tensão de cisalhamento meridional.

- São considerados os meses de outubro a maio. As isolinhas possuem valores de 0,2 em 0,2. As áreas hachuriadas possuem significância estatistica acima de 95%.




b) índice de precipitação de Hastenrath (1986)

Fig. 4.3 - Conclusão.

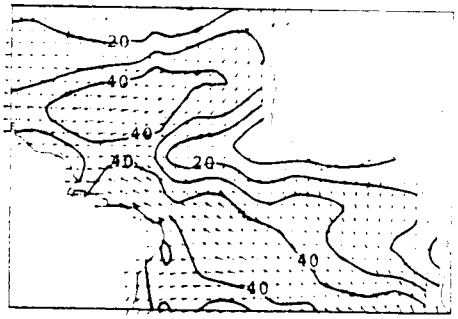
Notou-se durante todo o período (exceto outubro e novembro) que na região de confluência dos alísios concentram-se os maiores coeficientes de correlação, com significância estatística acima de 95%, deixando clara a importância dessa região (que é representativa da posição da ZCIT) para a precipitação no Nordeste. Este resultado concorda com o obtido por Servain & Seva (1987).

Outro fato que se mostrou bastante interessante foi o aparecimento de um núcleo de alta correlação (negativa), com significância de até 99% sobre a região próxima ao centro da alta pressão do Atlântico Sul nos meses de novembro e dezembro, mostrando a relação dessa alta com a precipitação no Nordeste (PNE). Ressalta-se novamente que tal resultado deve ser visto com cautela devido à já citada baixa densidade de dados sobre o Oceano Atlântico Sul. Servain (1987) observou este núcleo de alta correlação; porém, também ressaltou o fato de na região haver uma baixa densidade de dados.

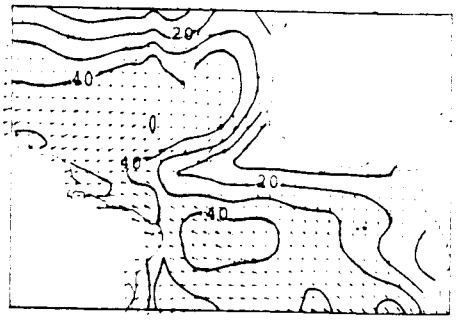
## 4.4 - MÉDIAS DE TENSÃO DE CISALHAMENTO SUPERFICIAL

Foram calculadas médias aritméticas para conjuntos de anos secos e chuvosos da tensão de cisalhamento superficial sobre toda a área de estudo para os meses de novembro a maio, período que antecede ou constitui a estação chuvosa do Nordeste. Estas médias são mostrados na Figura 4.4.

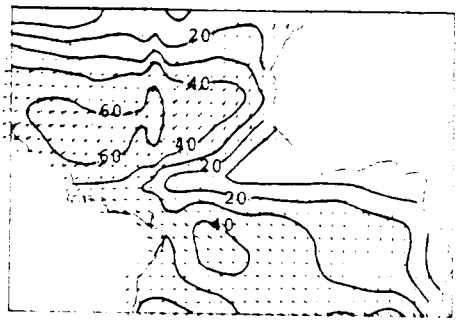
novembro



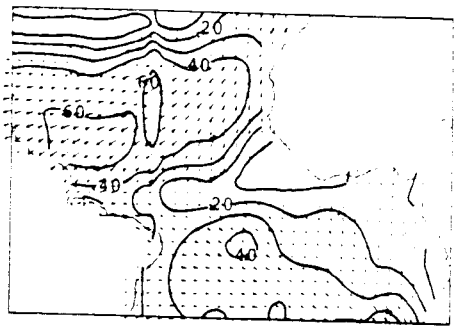

dezembro



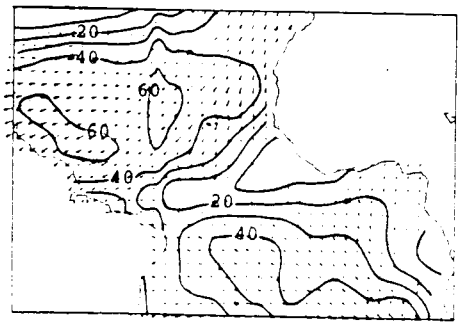

janeiro



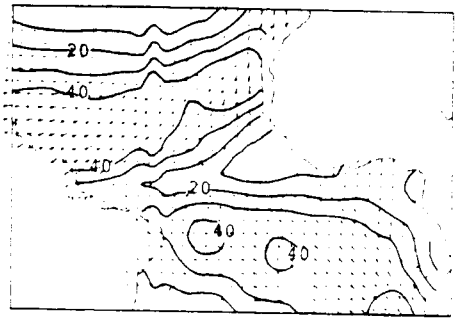

fevereiro



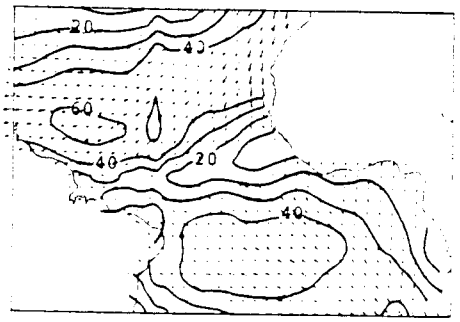

março




abril




maio



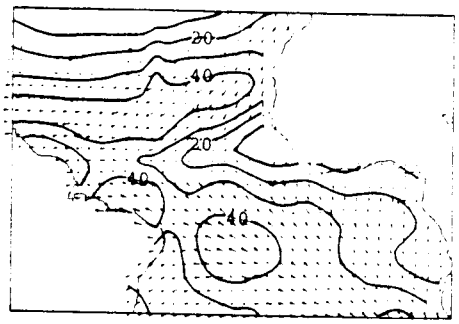

a) anos chuvosos (71, 73, 74, 77, 84, 85)

(continua)

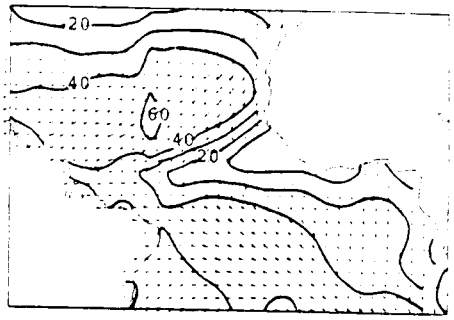
Fig. 4.4 - Média da tensão de cisalhamento superficial de novembro a maio.

- As isolinhas são a cada 10 $m^2/s^2$.

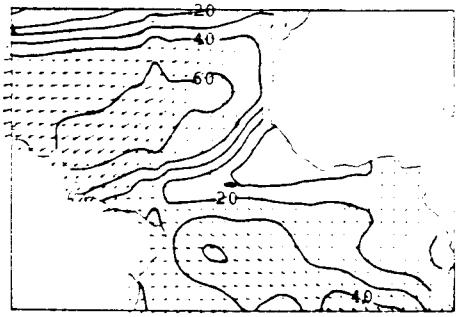
novembro



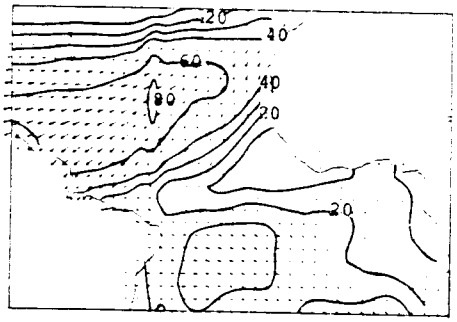

dezembro



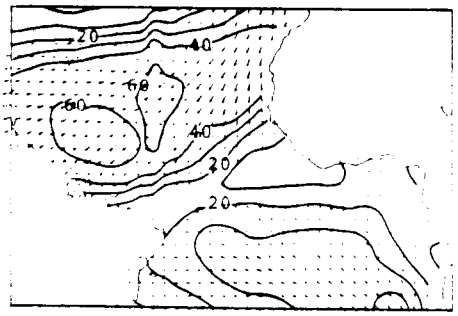

janeiro



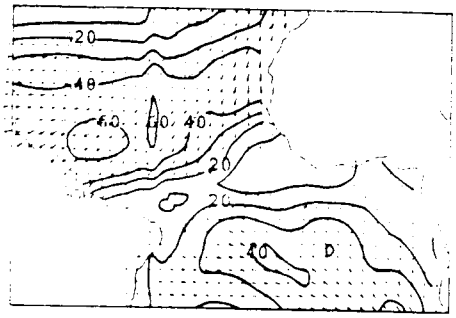

fevereiro



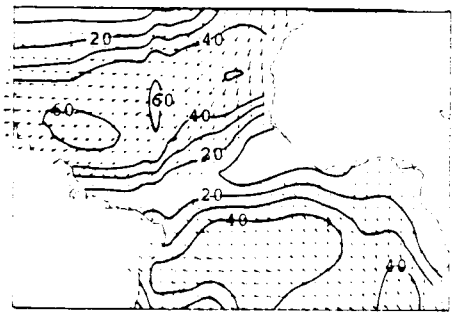

março




abril




maio




b) anos secos (72, 76, 79, 80, 82, 83)

Fig. 4.4 - Conclusão.

Analisando as médias de tensão de cisalhamento superficial do vento (TAU) (Fig. 4.4) para conjuntos de anos secos e chuvosos, observou-se, como era de esperar, a configuração de ventos alísios de SE no Atlântico Sul e de NE no Atlântico Norte, com uma zona de ventos fracos aparecendo ao longo da região de confluência dos alísios.

Essa faixa de ventos mais fracos estende-se, durante os meses estudados, na direção sudoeste-nordeste entre o Brasil e a África, numa latitude média de $5^{o}N$, alargando-se próximo à África (faixa de aproximadamente $6^{o}$) e estreitando-se em direção ao Brasil.

Foi interessante notar que, nas médias para anos secos, essa faixa de ventos mais fracos manteve-se em torno de $0^{o}$ de janeiro a maio e não chegou a alcançar o Nordeste, estendendo-se até a África durante todo o período. Próximo à costa brasileira o vento se apresentou mais intenso com valores de TAU próximos ou superiores a 50 $m^2/s^2$.

Em anos chuvosos, a faixa de ventos mais fracos atinge o Brasil, estende-se até a África em torno de $4^{o}S$ de latitude a partir de março e matém-se assim nos dois meses seguintes (Fig. 4.4).

Em abril pôde-se notar a maior diferença na posição da Zona de Confluência entre as duas médias. Em anos chuvosos ela se aproxima do Brasil e atinge o paralelo de $4^{o}S$, ao passo que em anos secos os ventos mais fracos se mantêm ao longo de $0^{o}$.

Em relação à intensidade dos alísios, comparando as médias mês a mês, notou-se que para anos

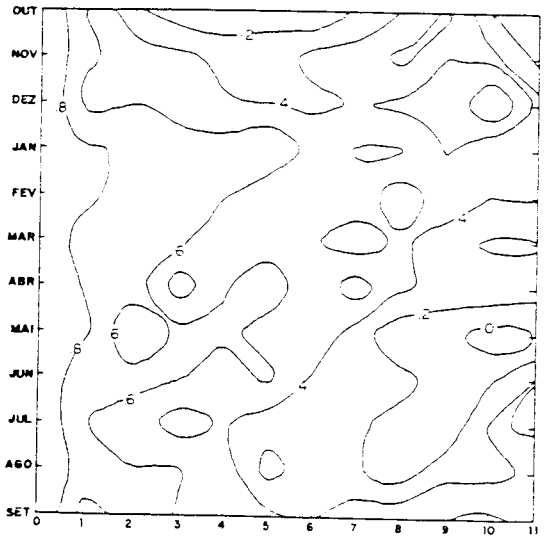
secos as médias apresentam alísios de SE mais intensos; para anos chuvosos apresentam alísios de NE mais intensos.

Essa diferença de intensidade, porém, é pouco perceptível nos meses de novembro e dezembro (precedentes à estação chuvosa), intensificando-se mês a mês a partir de janeiro e tornando-se máxima em abril, quando a diferença entre a tensão de cisalhamento superficial para anos chuvosos e secos sobre o Atlântico Tropical Norte é maior que 20 $m^2/s^2$.

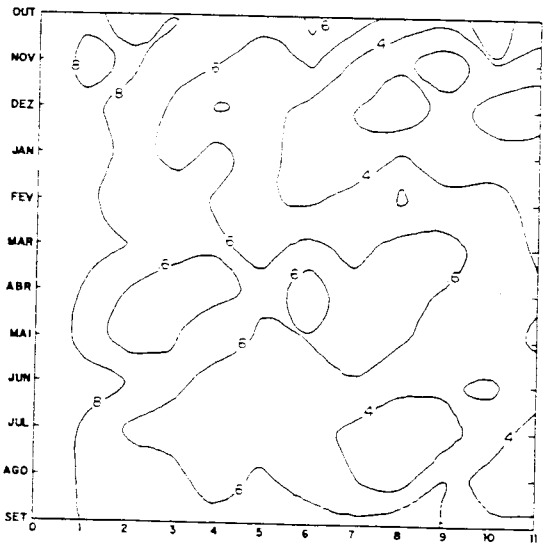
## 4.5 - PERSISTÊNCIA DA TSM

Após a análise dos mapas de isolinhas de correlação entre PNE e anomalias de TSM, foram escolhidas as áreas que mantiveram significância estatística acima de 95% durante a maior parte do período, nas quais foi analisada a persistência da TSM, a exemplo de Wright (1985). Tal método consiste em calcular o índice de correlação entre a média das anomalias de TSM, de cada área escolhida, em um certo mês, e a média das anomalias de TSM, da mesma área em cada um dos 11 meses seguintes. Esses resultados são mostrados na Figura 4.5.

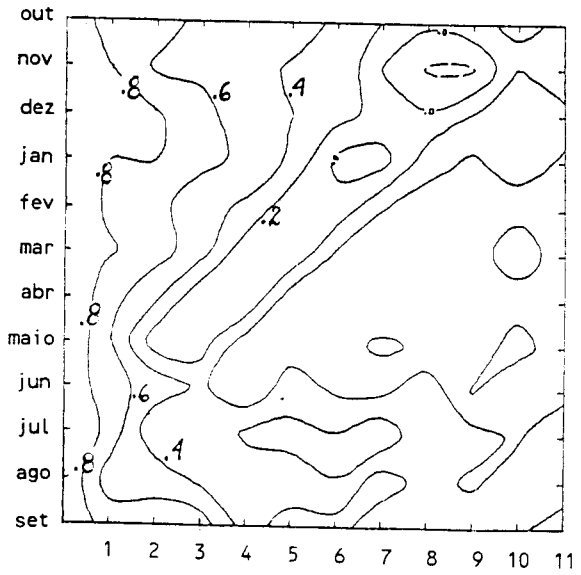
Ao todo foram analisadas 9 áreas, das quais 6 foram selecionadas com base nos altos valores de correlação entre a PNE e anomalias de TSM; a sétima foi escolhida similarmente à área usada por Wright (1985); e as duas últimas englobam todo o Atlântico Tropical Norte e Atlântico Tropical Sul, respectivamente, considerando como uma divisão entre eles a posição média da ZCIT determinada por Hastenrath & Heller (1977), a qual possui uma direção de sudoeste para nordeste no Atlântico Equatorial. As áreas escolhidas podem ser vistas na Figura 3.1.



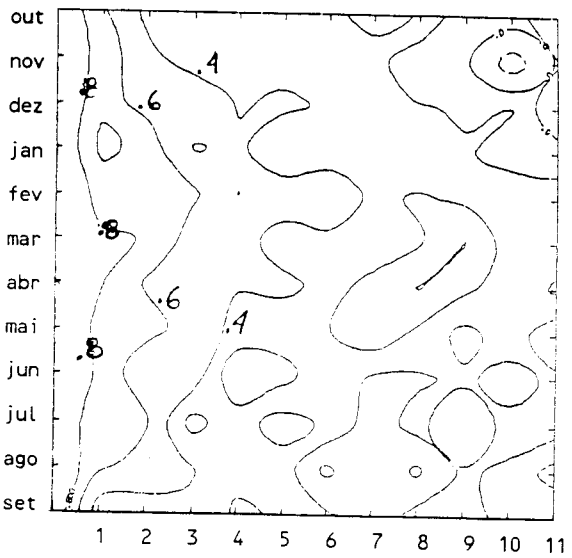

a) região CS




b) região BN




c) região CN

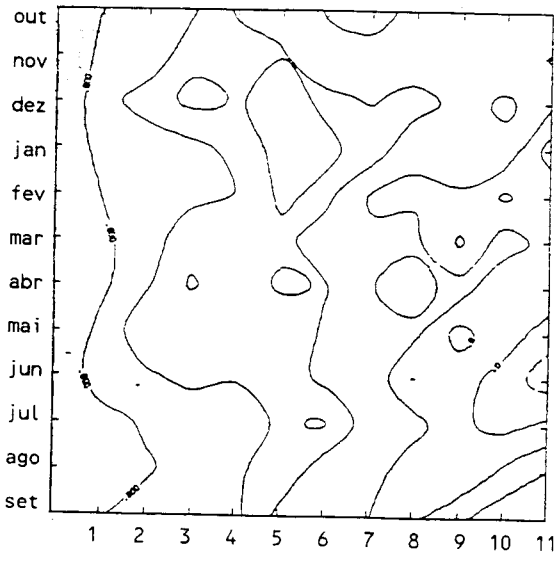



d) região AN

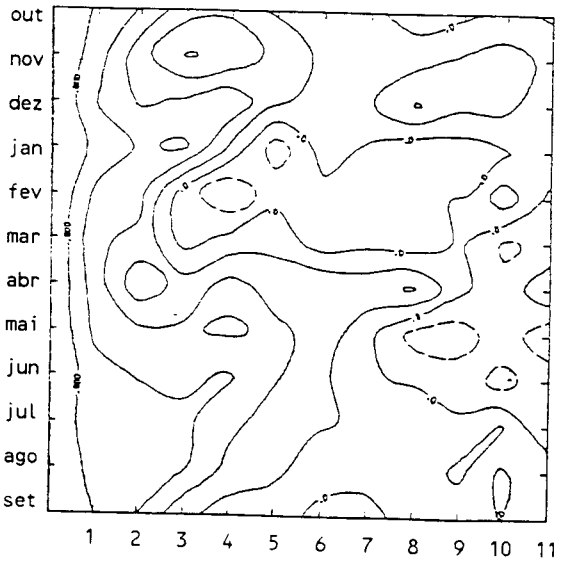
(continua)

Fig. 4.5 - Diagramas de autocorrelação de anomalias de temperatura da superfície do mar.

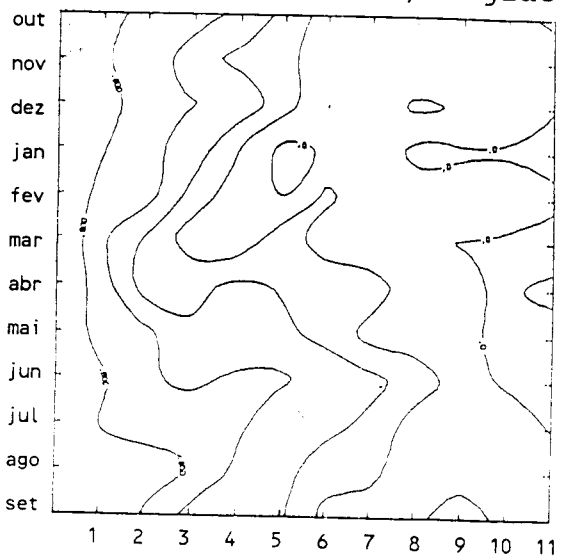
- Isolinhas de 0,2 em 0,2



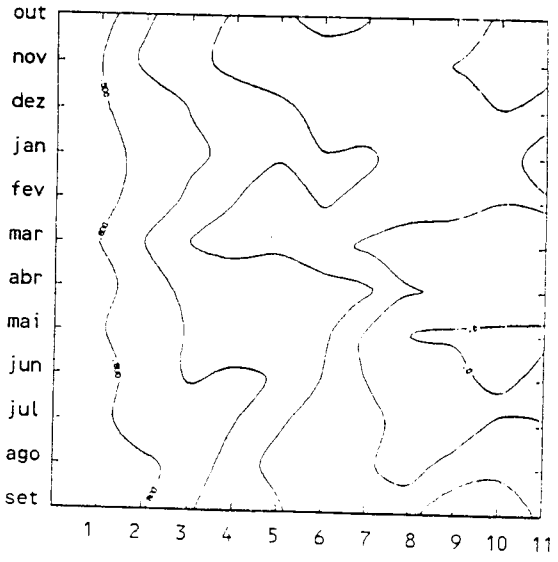

e) região BE



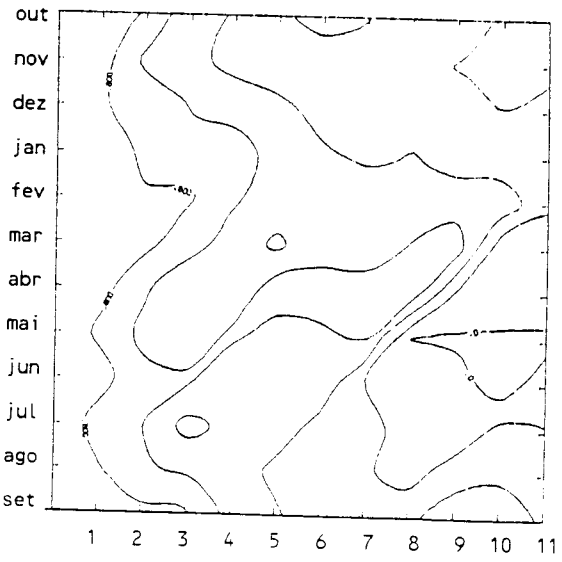

f) região GN




g) região WRIGHT




h) ATLÂNTICO SUL




i) ATLÂNTICO NORTE

Fig 4.5 - Conclusão.

Os resultados para a área similar à de Wright (1985) (Fig. 4.5g) foram bastante semelhantes aos obtidos naquele trabalho, como era de esperar.

A análise da persistência mostrou que, para fins de "previsibilidade por persistência" (Wright, 1985), algumas áreas mostraram-se bem mais persistentes que outras. Dentre elas, as áreas BN e CS (Fig. 3.1) se destacaram por serem áreas que apresentaram, durante alguma época do ano, persistência na TSM de até 5 meses (correlações acima de 0,6). No caso CS (Fig. 4.5a), a persistêcia máxima acontece de janeiro a maio, indicando que em janeiro já se teria uma noção do comportamento da TSM na região durante a estação chuvosa no Nordeste (fevereiro a maio).

Observando a região BN (Fig.4.5b) nota-se que a época de máxima persistência acontece em setembro e outubro, e também de março a maio quando se encontram correlações acima de 0,6 com o sexto mês subseqüente.

É interessante notar que a área CS se encontra um pouco ao norte da posição média do centro da Alta do Atlântico Sul durante o período estudado e a área BN, um pouco ao sul da posição média do centro da Alta do Atlântico Norte.

Outra área que apresentou persistência de interesse para o Nordeste foi o Atlântico Norte como um todo, pois apresentou em fevereiro correlação de 0,8 até o terceiro mês. Desta forma, em fevereiro pode-se ter uma idéia se o padrão bipolar vai persistir durante março, abril e maio.

## 4.6 - COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ENTRE ÍNDICES DE PRECIPITAÇÃO E POSIÇÃO DA ZCIT.

Foi calculada a correlação entre a posição da ZCIT e a precipitação sazonal no Nordeste, considerando a posição da ZCIT nos meses de janeiro a agosto, assim como a correlação entre os índices mensais de PNE de novembro a julho e os índices sazonal e anual de Nobre & Paião (1986) (PNENPs e PNENPa, respectivamente). Esses resultados são mostrados nas Tabelas 4.1 e 4.2, respectivamente.

Analisando os coeficientes de correlação entre as séries de índices de precipitação PNENPa e PNEIm, observou-se que a precipitação nos meses de abril e maio está melhor relacionada com a precipitação anual do Nordeste; o mês de abril apresentou uma correlação de 0,76 e o mês de maio, de 0,80 (Tab. 4.2). Isto implica que a precipitação nesses dois meses é fundamental em relação à pluviometria da estação chuvosa e anual, uma vez que a distribuição anual da precipitação é concentrada nos 3 ou 4 meses da estação chuvosa.

Observando a correlação entre as séries PNENPs e PNETm, nota-se que abril e maio são os meses melhor relacionados com a qualidade da estação chuvosa (0,79 e 0,78, respectivamente), o que sugere que esta está ligada diretamente à precipitação nesses dois meses.

Esse resultado foi confirmado pelas análises da posição da ZCIT, que mostra que é a posição nos meses de março, abril e maio que define a qualidade da estação chuvosa, o que será mostrado na seção 4.8.

TABELA 4.1

COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ENTRE A POSIÇÃO DA ZCIT NOS MESES DE NOVEMBRO A AGOSTO E A PRECIPITAÇÃO SAZONAL NO NORDESTE.

| pos ZCIT | nov | dez | jan | fev | mar | abr | mai | jun | jul | ago |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| PNE saz | -.33 | -.34 | -.28 | -.43 | -.59 | -.90 | -.81 | -.75 | -.74 | -.20 |

a) ZCIT em 35°W

| pos ZCIT | nov | dez | jan | fev | mar | abr | mai | jun | jul | ago |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| PNE saz | -.08 | -.13 | -.21 | -.42 | -.61 | -.88 | -.82 | -.75 | -.75 | -.45 |

b) ZCIT em 40°W

| pos ZCIT | nov | dez | jan | fev | mar | abr | mai | jun | jul | ago |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| PNE saz | -.08 | -.11 | -.10 | -.14 | -.65 | -.85 | -.82 | -.73 | -.77 | -.49 |

c) ZCIT em 45°W

- Correlações acima de 0,53, em módulo, possuem significância estatística maior que 95%).

TABELA 4.2

COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ENTRE OS ÍNDICES DE PRECIPITAÇÃO SAZONAL E ANUAL DE NOBRE E PAIÃO (1986) E OS ÍNDICES MENSAIS DE PRECIPITAÇÃO DE NOVEMBRO A JULHO.

| PNE | nov | dez | jan | fev | mar | abr | mai | jun | jul |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| sazonal | .17 | .23 | .39 | .61 | .70 | .79 | .78 | .38 | .22 |
| anual | .27 | .40 | .61 | .56 | .57 | .76 | .80 | .54 | .41 |

- correlações acima de 0,23, em módulo, possuem significância estatística maio que 95%.

Apesar de a série de índices mensais de precipitação para abril e maio mostrar uma grande relação com a PNENPs e a PNENPa, as séries de índices mensais para cada mês separadamente não se mostraram altamente correlacionados entre si, o que indica que a precipitação em cada mês não depende da precipitação no mês anterior. Isto pode ser examinado no diagrama de autocorrelação para as precipitações mensais (Fig. 4.6). Os maiores valores, da ordem de 0,4 para dois meses, são encontrados em abril.

Vale notar aqui que Hastenrath et alii (1984) encontraram correlações significantes entre índices de precipitação pré-sazonais (precipitação em out-nov, out-jan e out-fev) e índices de precipitação sazonais (precipitação de mar-abr e mar-set).

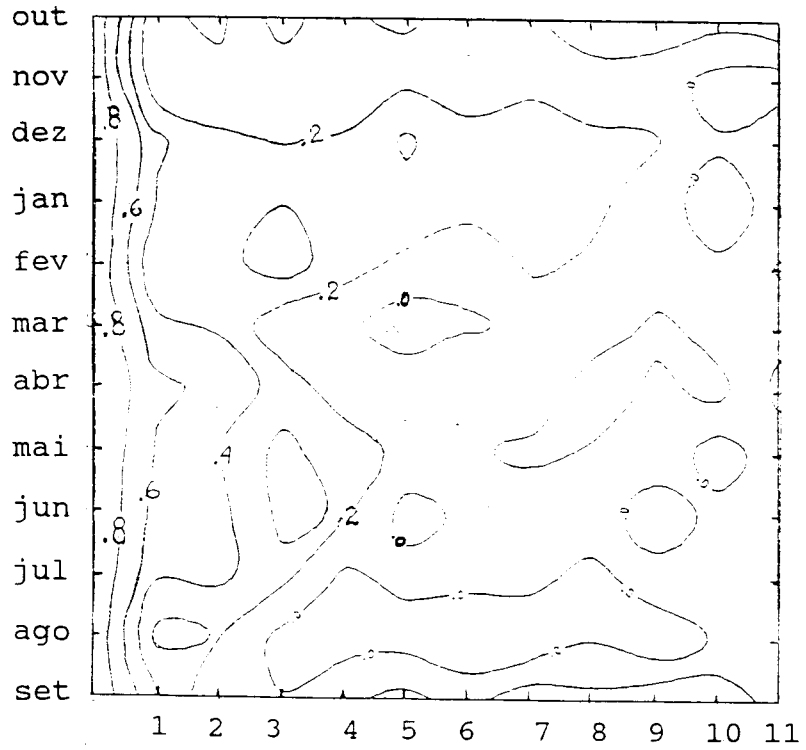



Fig. 4.6 - Diagrama de autocorrelação para índices de precipitação mensal.

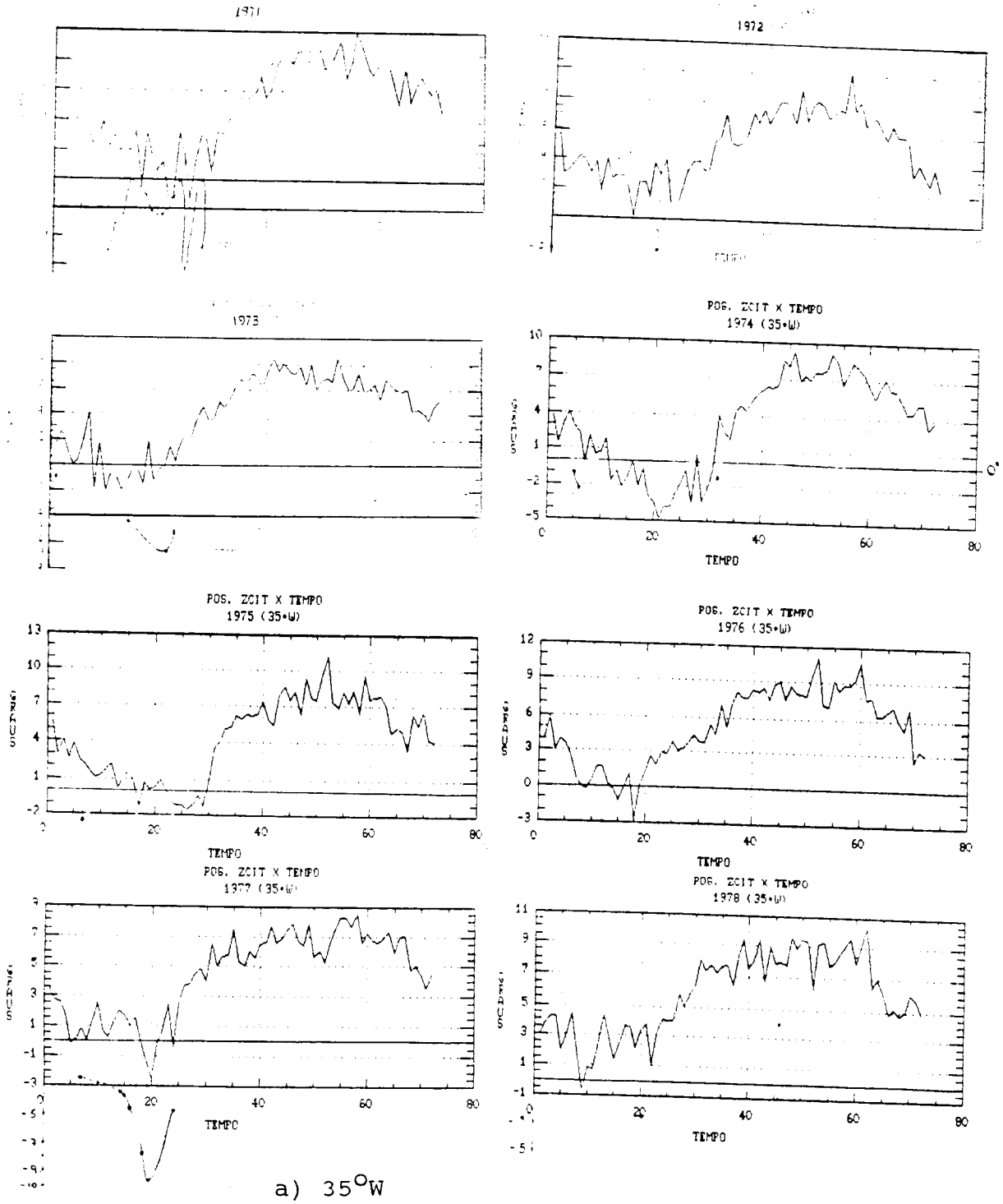
## 4.7 - POSIÇÃO DA ZONA DE CONVERGÊNCIA INTERTROPICAL (ZCIT)

As séries da posição da ZCIT para 35°W, 40°W e 45°W foram plotadas ano a ano e são apresentadas na Figura 4.7. Foram também calculadas e plotadas as médias da marcha anual da ZCIT de 1971 a 1987 e da posição da ZCA de 1971 a 1985, as quais são apresentadas nas Figuras 4.8 e 4.9, respectivamente, acompanhadas dos desvios padrões. A climatologia foi calculada a partir de uma média aritmética que considera todos os dados disponíveis em cada pêntada.

Também foram calculadas médias da posição da ZCIT e da ZCA para uma série de anos secos e de anos chuvosos (Fig. 4.10 e 4.11, respectivamente). Os anos foram classificados como secos ou chuvosos considerando os índices de precipitação de Nobre & Paião (1986).

Foram classificados como anos chuvosos os anos de 71, 73, 74, 77, 85 e 86 e os anos de 72, 76, 79, 80, 82 e 83, como secos.

A análise dos dados da posição da banda de nebulosidade convectiva no Atlântico Equatorial, indicativa da posição da ZCIT a cada pêntada de 1971 a 1987 (Fig. 4.7), revelou que a ZCIT, ao longo das três longitudes estudadas (35°W, 40°W e 45°W), possui uma alta variabilidade em sua posição nessa escala de tempo, além de sua oscilação normal ao longo do ano, apresentando posições mais ao sul (em torno de 1°N) nos meses de fevereiro e março e posições mais ao norte (aproximadamente 8°N) durante os meses de julho e agosto.




a) 35°W

(continua)

Fig. 4.7 - Posição latitudinal do eixo de nebulosidade convectiva sobre o Atlântico Equatorial.

- O tempo é dado em pêntadas (5 dias). As linhas ou pontos que aparecem sob a curva principal são relativos à banda dupla de convecção.

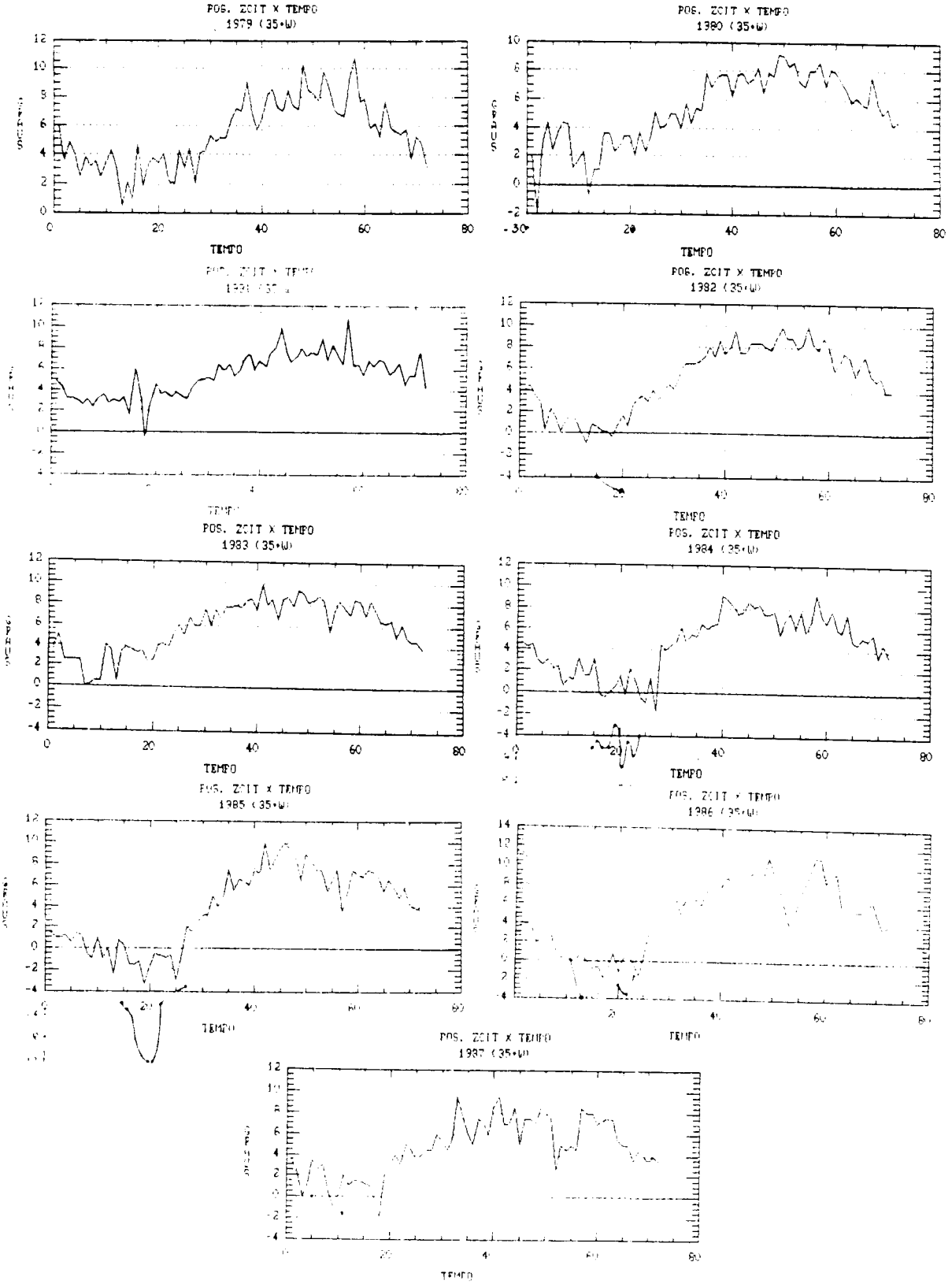
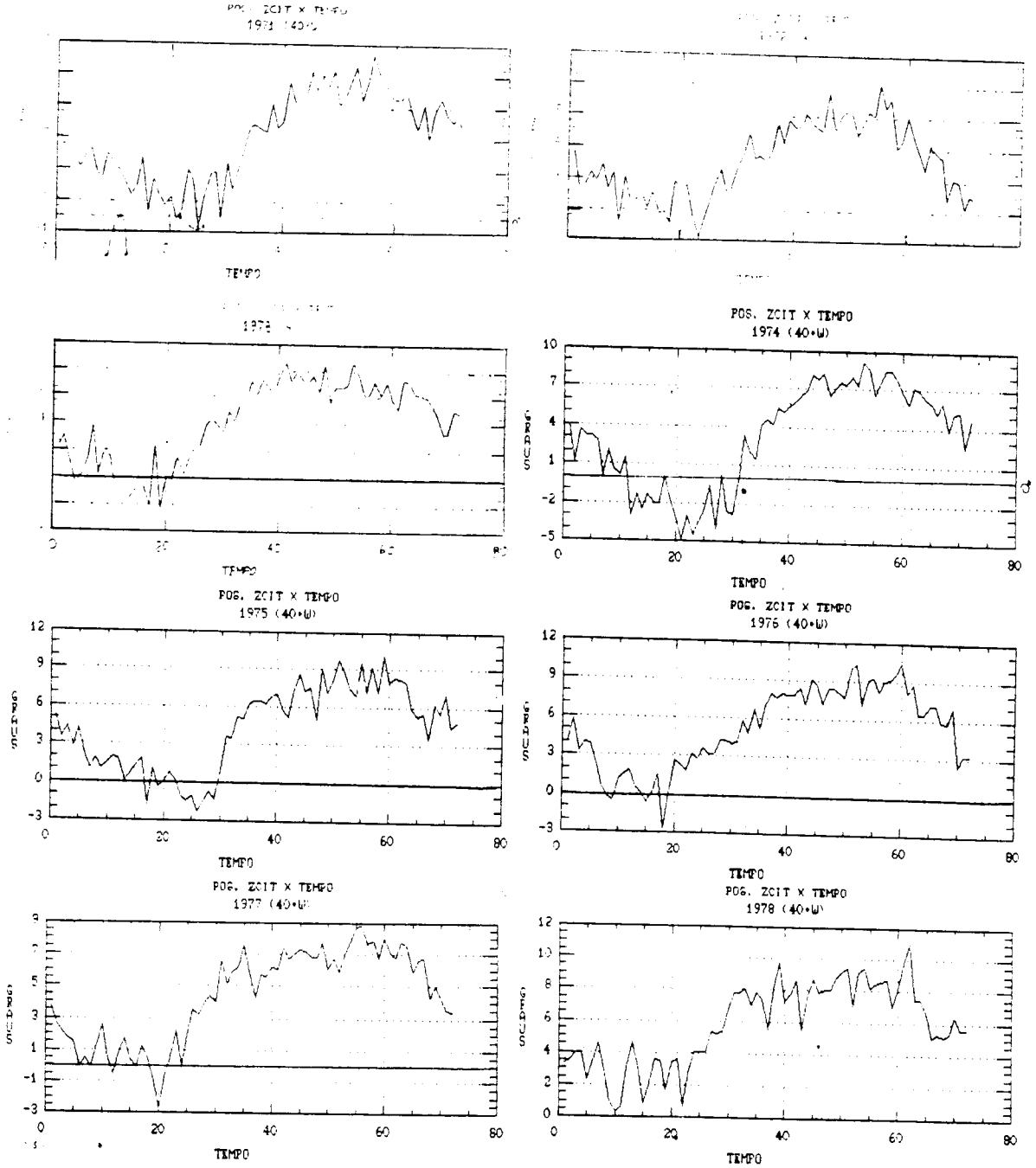



Fig. 4.7 - Continuação




b) 40°W

Fig. 4.7 - Continuação

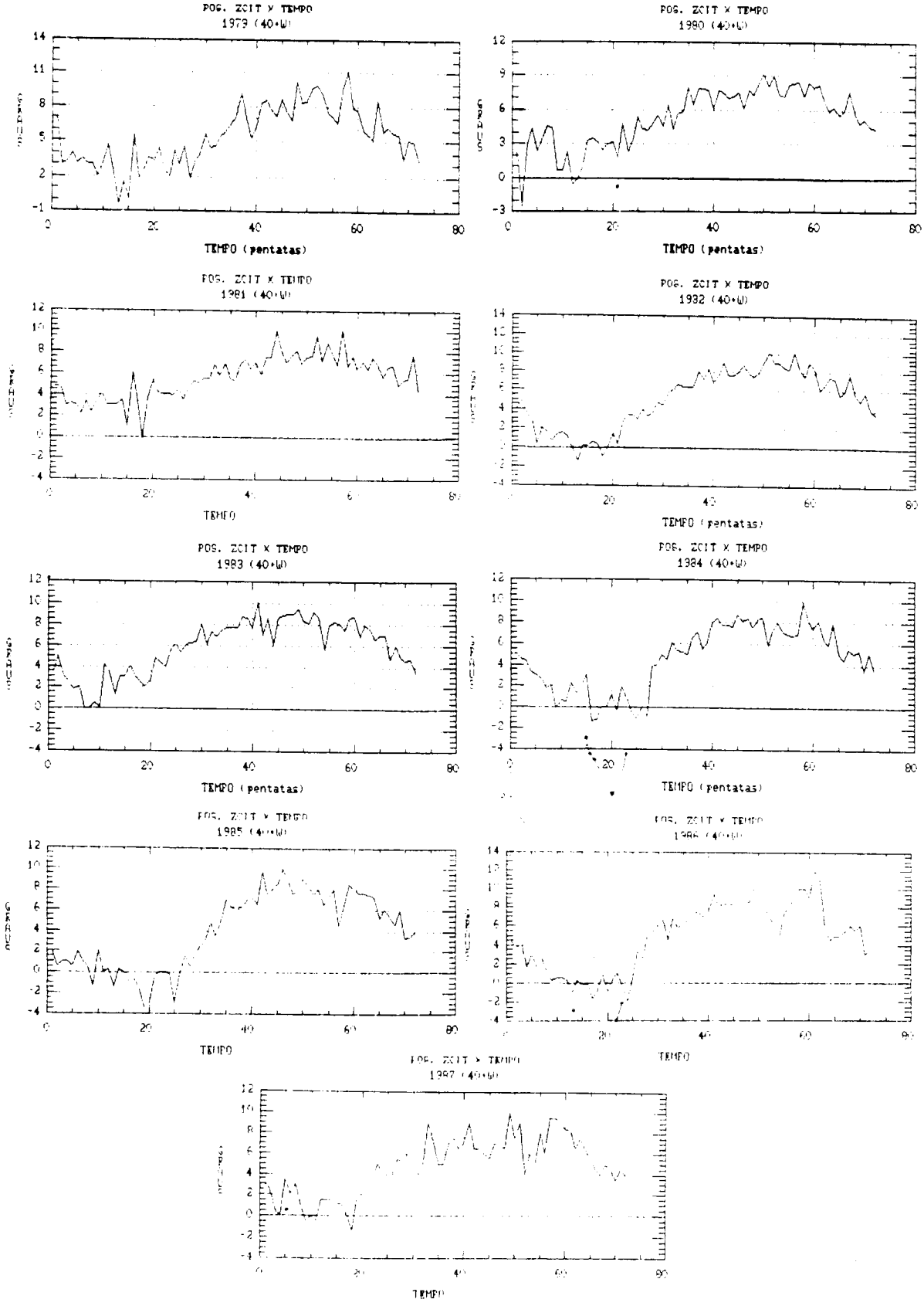
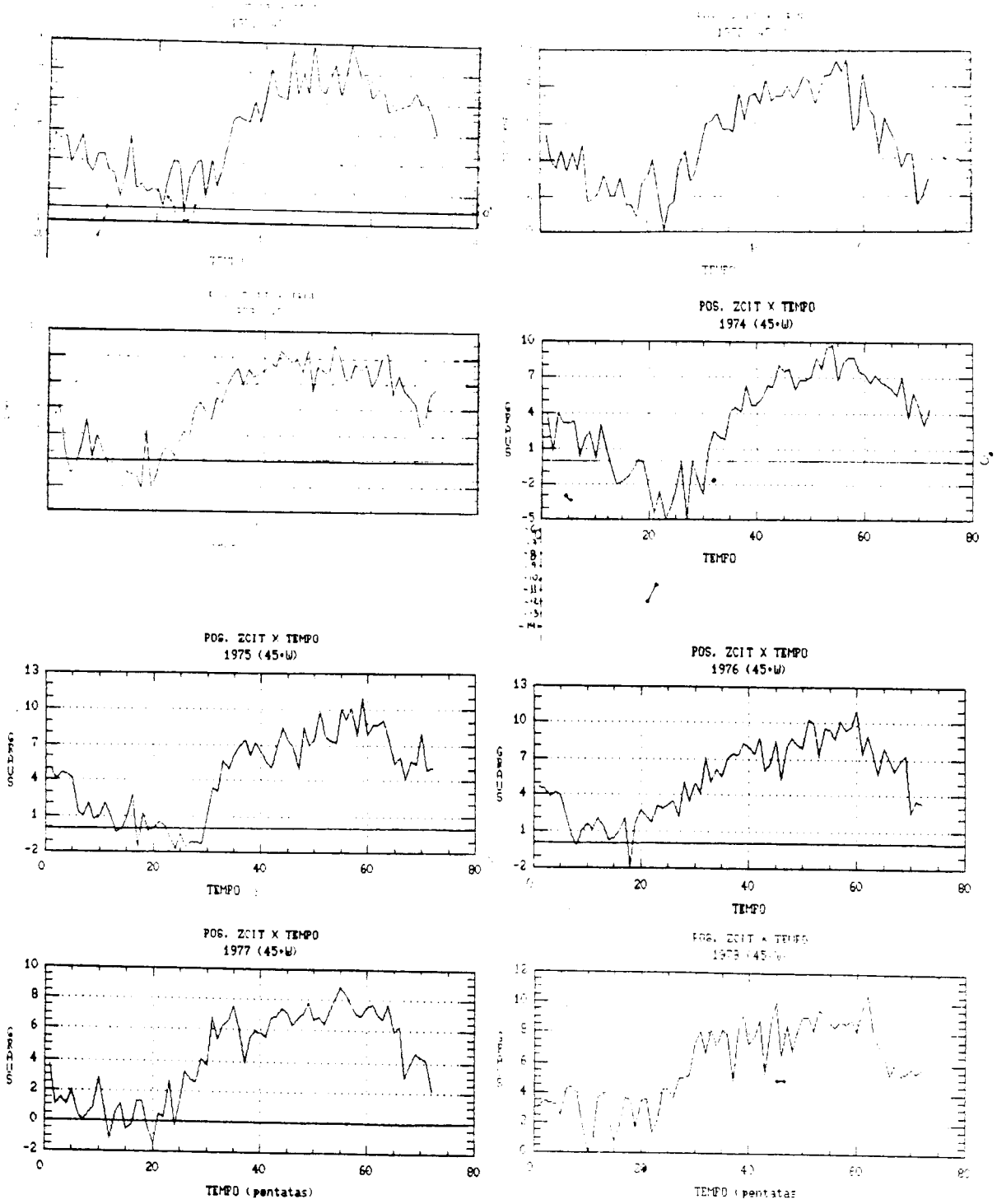
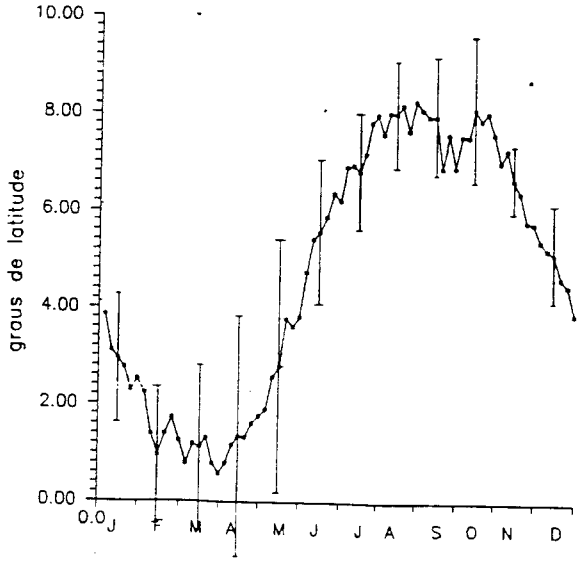



Fig. 4.7 - Continuação

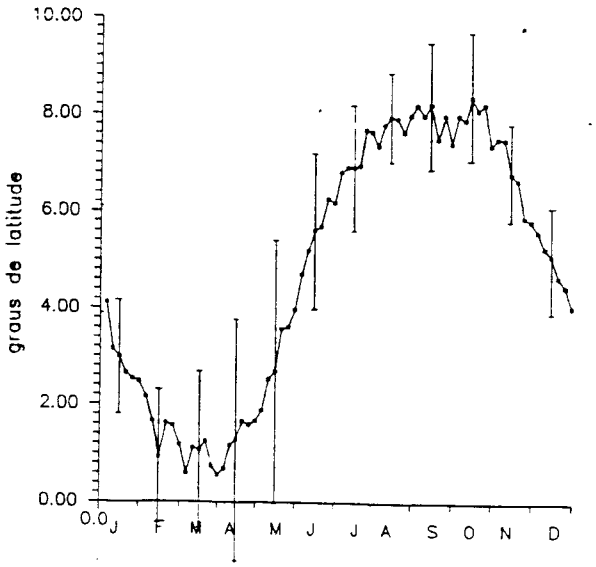



c) 45°W

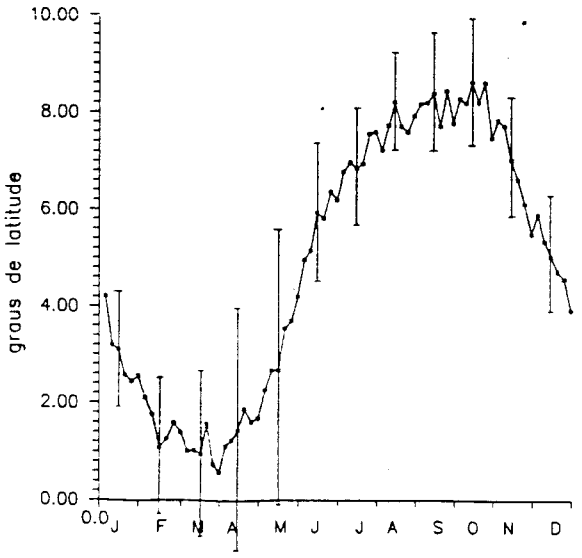
Fig. 4.7 - Continuação




a) 35°W




b) 40°W




c) 45°W

Fig. 4.8 - Média da marcha anual da ZCIT.

- As barras verticais são representativas dos desvios padrões.

Foram escolhidas três longitudes (35°W, 40°W e 45°W) com o objetivo de analisar se havia variações longitudinais significativas na posição da ZCIT próximo ao Nordeste; porém, as três séries apresentaram comportamentos bastante semelhantes com coeficientes de correlação de 0,98 entre as séries ao longo de 35° e 40°W e 40° e 45°W e correlação de 0,95 entre as séries ao longo de 35°W e 45°W.

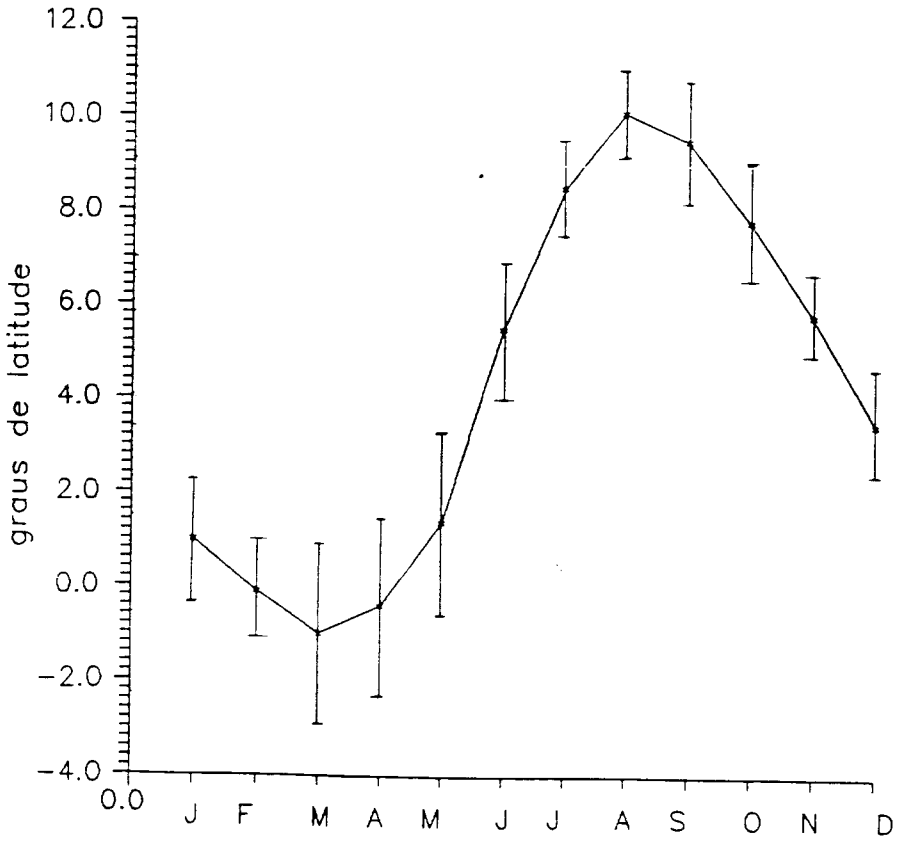



Fig. 4.9 - Média da marcha anual da ZCA.

- Posição ao longo de 30°W. As barras verticais são relativas aos desvios padrões.

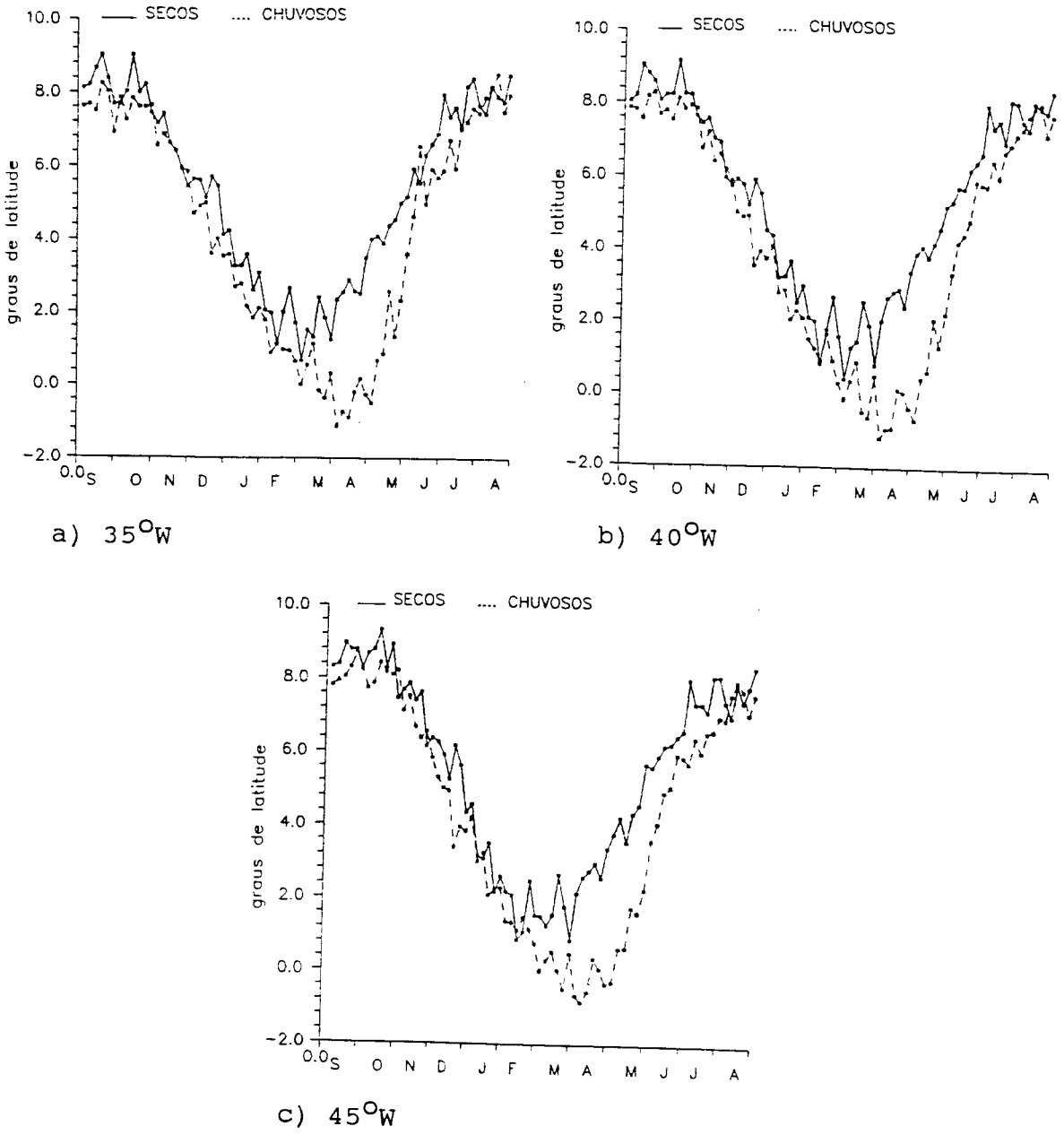



Fig. 4.10 - Médias para um conjunto de anos secos e anos chuvosos da posição da ZCIT.

- Linha cheia para anos secos (72, 76, 79, 80, 82 e 83) e pontilhada para anos chuvosos (71, 73, 74, 77, 84 e 85).

Comparando estas séries com a série de Citeau et alii (1988b), que é formada pela posição média semanal da ZCIT ao longo de 28°W, considerando porém, médias mensais para todas as séries devido à diferença na escala temporal, (Citeau et alii, 1988b consideram 4 posições por mês) foram encontrados, respectivamente, coeficientes de correlação de 0,92; 0,90 e 0,89 entre as séries ao longo de 35°W, 40°W e 45°W e a série de Citeau et alii (1988b).

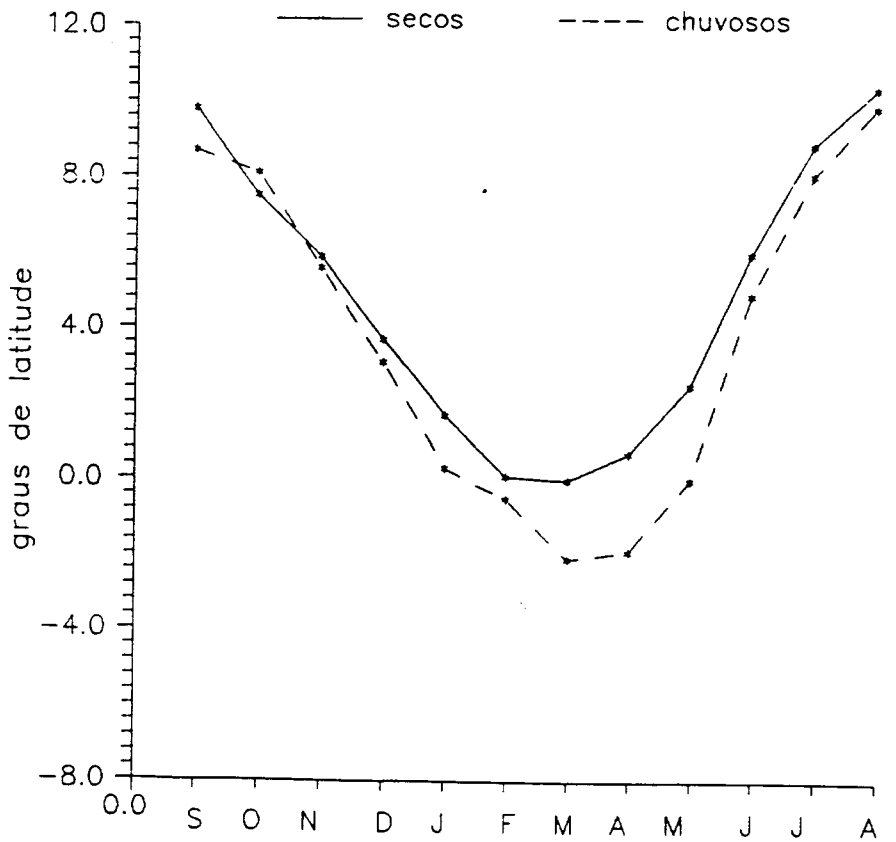



Fig. 4.11 - Média para conjunto de anos secos da ZCA.

- Linha cheia para anos secos (72, 76, 79, 80, 82 e 83) e pontilhada para anos chuvosos (71, 73, 74, 77, 84 e 85).

Na análise da média da marcha anual da ZCIT (Fig. 4.8) observou-se que esta ainda apresenta (para as três séries) uma curva pouco suave devido à alta variabilidade da posição da ZCIT na escala de tempo de 5

dias, ao número restrito de anos de dados (17 anos) e, possivelmente, também aos erros introduzidos na análise.

Ao analisar os desvios em relação à climatologia em cada pêntada, observou-se que estes são maiores em fins de março e nos meses de abril e maio, diminuindo progressivamente até alcançar seu mínimo durante o mês de agosto, voltando a aumentar e novamente diminuindo em novembro e dezembro. Por uma questão de estética da figura, podem ser vistos na Figura 4.8 apenas os desvios relativos à terceira pêntada de cada mês.

Esses desvios máximos na posição da ZCIT nos meses de março, abril e maio parecem estar relacionados com a variação na posição da ZCIT durante anos secos e chuvosos, o que irá influenciar na qualidade da estação chuvosa do Nordeste.

As médias para anos chuvosos (nas três longitudes escolhidas), que são apresentadas na Figura 4.10, considerando o ano iniciando em setembro e terminando em agosto, mostram que a ZCIT inicia (de aproximadamente $8^{o}N$) sua migração para o sul a partir de outubro, alcançando sua posição mais ao sul (em torno de $1^{o}S$) em abril e a seguir iniciando seu retorno ao norte de forma rápida, na primeira quinzena de maio, para atingir sua posição mais setentrional no mês de agosto.

No caso de anos secos (Fig. 4.10), a ZCIT inicia sua migração para latitudes mais equatoriais na primeira quinzena do mês de outubro, a partir de uma posição em aproximadamente $9^{o}N$, atingindo suas posições mais ao sul ($1^{o}N$) no final de fevereiro e então retornando para o norte de forma mais lenta a partir de março, atingindo suas posições mais setentrionais também no mês de agosto.

Comparando as duas médias (Fig. 4.10), nota-se que, a partir do final de novembro, em anos chuvosos, a ZCIT aparece aproximadamente $0,8^{o}$ ao sul de sua posição para anos secos, até o fim do mês de janeiro, quando, em anos secos, ela dá um salto de aproximadamente $1,5^{o}$ em direção ao norte (Fig. 4.10), retornando ao sul no fim de fevereiro, quando inicia seu retorno definitivo ao Hemisfério Norte. De fins de fevereiro até julho, aparecem as maiores diferenças entre as duas médias. No mês de março, em anos secos, a ZCIT encontra-se por volta de $2,5^{o}$ ao norte de sua posição no mesmo período em anos chuvosos, em abril, em torno de $3,5^{o}$ e no início de maio, $4,5^{o}$. Em fins de maio, a diferença começa a diminuir durante o retorno da ZCIT para o norte, para ser mínima no início de agosto quando não há diferença significativa entre as posições para anos secos e chuvosos.

Em síntese, a ZCIT apresenta, em anos chuvosos, uma posição ligeiramente ao sul de sua posição normal nos meses de dezembro e janeiro; porém, isto é de pouca utilidade para previsão, pois essa diferença é menor que o erro na determinação da posição da ZCIT. No entanto, a posição da ZCA apresenta uma diferença bem maior; portanto, o campo de vento parece um melhor estimador da qualidade da estação chuvosa.

Através do cálculo de correlações entre a posição da ZCIT nos meses de janeiro a agosto e a precipitação sazonal do Nordeste (Tabela 4.1), mais uma vez observou-se que a posição da ZCIT nos meses de abril e maio apresenta-se melhor correlacionada com a precipitação sazonal, atingindo índices de até -0,9 para a posição ao longo de $35^{o}W$ no mês de abril e o PNENPs indicando que quanto mais a sul a ZCIT estiver nessa época, melhor será a qualidade da estação chuvosa. Nos meses de junho e julho

observa-se que os coeficientes de correlação ainda são altos (em torno de -0,7).

Nota-se então que a determinação de se uma estação será chuvosa ou não depende principalmente da quantidade de precipitação nos últimos meses da estação, a qual esta está diretamente relacionada com o período de permanência da ZCIT próximo ao Equador.

## 4.8 - POSIÇÃO DA ZCA

Situação semelhante à da ZCIT é observada com a Zona de Confluência dos ventos alísios (ZCA) (Fig. 4.9), a qual, porém, apresenta em sua oscilação anual uma amplitude maior que a da ZCIT, atingindo posições mais ao sul que a ZCIT de fevereiro a abril e posições mais ao norte em julho e agosto. Esse fato é facilmente observável analisando a Figura 3.3, onde é apresentada a posição da ZCA ao longo de $30^{o}W$ comparada com a posição da ZCIT ao longo de $28^{o}W$, encontrada por Citeau et alii (1988b).

Analisando as médias de ZCA para anos secos e chuvosos (Fig. 4.11), observa-se que durante anos chuvosos, a partir de novembro, a ZCA aparece aproximadamente $1^{o}$ ao sul da posição desta zona em anos secos. Essa diferença tende a aumentar, atingindo seu máximo em abril e maio, quando ela é aproximadamente $3^{o}$, e então volta a diminuir para aproximadamente $1^{o}$ a partir de junho, quando a ZCA está retornando para suas posições mais ao norte. Nota-se ainda que em anos secos a ZCA não atinge o Hemisfério Sul, apresentando suas posições mais ao sul ($0^{o}$) em fevereiro e março, ao passo que para anos chuvosos a ZCA cruza o equador em direção ao sul, atingindo até $2^{o}S$ em março e abril.

Os desvios em relação à posição média da ZCA (Figura 4.11) apresentam o mesmo comportamento que os desvios da ZCIT, sendo máximos em março, abril e maio e mínimos em agosto, novembro e dezembro.

Pode-se observar, entretanto, que a ZCA apresentou menor variabilidade e flutuações que a ZCIT, o que se deve ao fato de que são usadas médias mensais da posição da ZCA, do processo de suavização utilizado por Servain et alii (1985) na geração dos dados e também porque os ventos de grande escala apresentam menor variabilidade do que a banda de nuvens convectivas. Outro fator que influencia essa diferença de variabilidade é o fato de que a ZCIT foi determinada numa grade de $1^{o}$ x $1^{o}$ e a ZCA, numa grade de $2^{o}$ x $2^{o}$.

## 4.9 - SOBRE O "SALTO" DE FEVEREIRO

Durante a observação das posições da ZCIT médias mensais para anos considerados secos ou chuvosos (Figura 4.10), notou-se que no mês de fevereiro, principalmente durante anos secos, a ZCIT apresenta uma interrupção no seu deslocamento para o sul, voltando aproximadamente $1,5^{o}$ para o norte e retornando em direção ao sul para então atingir sua posição mais ao sul. Esse comportamento será, a partir de agora, denominado "salto".

No mês de março, em anos secos, um novo salto é observado; somente após esse segundo salto, a ZCIT inicia seu retorno definitivo para o norte. Esses saltos foram observados também em outras épocas do ano; porém, não se farão observações referentes aos saltos de fevereiro e março, pois podem influenciar mais diretamente na estação chuvosa do Nordeste.

Durante anos chuvosos, observa-se um pequeno salto no mês de março; porém, a ZCIT permanece ainda em suas posicões ao sul até, pelo menos, meados de maio quando iniciará seu retorno a posições setentrionais.

Quando se observa a média da marcha anual da posição da ZCIT, nota-se que os saltos de fevereiro e março ainda estão presentes, sendo o salto em fevereiro da ordem de $0,8^{o}$ de latitude o de março da ordem de $0,6^{o}$ de latitude.

As escalas temporais dos dois saltos também são diferentes, considerando a climatologia. Ao longo de $35^{o}W$ e $40^{o}W$, o salto de fevereiro tem uma escala temporal climatológica de 4 pêntadas e o de março de 5 pêntadas (vide Fig. 4.8). Ao longo de $45^{o}W$, o salto de fevereiro ainda mantém uma escala temporal de 5 pêntadas porém, o de março reduz seu tempo para apenas 2 pêntadas (Fig. 4.9).

Quando se observa ano a ano, apesar de a posição da ZCIT apresentar uma oscilação bastante alta, podem-se notar anos que apresentam saltos em fevereiro e/ou março bastante definidos.

Dos anos considerados como secos, os anos de 1976 e 1980 apresentaram saltos somente em fevereiro; os anos de 1979, 1982 e 1983 apresentaram saltos nos dois meses; apenas no ano de 1972 não foi possível identificar qualquer salto bem definido nos dois meses considerados.

Observando os anos chuvosos, notou-se que os anos de 1974, 1977, 1984 e 1985 apresentaram saltos somente em março, os anos de 1971, 1973 e 1977 apresentaram somente em fevereiro e o ano de 1975 apresentou saltos em fevereiro e março. Porém, durante os anos chuvosos, os saltos se mostraram bem menos definidos.

Em anos não considerados como secos ou chuvosos (78,87), observam-se saltos em fevereiro e março em 1978 e um salto em março de 1987.

## 4.10 - BANDA DUPLA DA ZCIT

Considera-se como banda dupla da ZCIT o aparecimento de uma segunda banda de cobertura convectiva ao sul da banda principal. Essa segunda banda não é tão bem organizada quanto a principal e, em geral, não permanece por muito tempo.

Denominamos banda principal à banda de nebulosidadade que se apresenta com maior constância e melhor definida durante todo o ano.

Notou-se que o aparecimento da banda dupla de convecção da ZCIT é um fenômeno esporádico que acontece, geralmente, durante os primeiros meses do ano, principalmente em fevereiro, março e abril.

Durante os anos em que a banda dupla apareceu (vide Fig. 4.7), sua permanência foi bastante variável; às vezes ela surgiu em um ou dois dias num mês, desapareceu e voltou a surgir em um ou dois dias no mês seguinte. Outras vezes ela permaneceu durante quatro ou cinco dias, desapareceu durante dois ou três dias e voltou a surgir permanecendo novamente por vários dias.

A segunda banda de convecção se localiza ao sul da banda principal. Apresenta também um deslocamento latitudinal que, preferencialmente, acompanha a banda principal; porém, a distância entre elas não é fixa e pode variar de $1^{o}$ a até uma dezena de graus de latitude.

Exemplos típicos são encontrados nos anos de 1971, 1977 e 1984 ao longo de 35°W (Fig. 4.8a).

Analisando a ocorrência de banda dupla da ZCIT em relação aos índices de precipitação, notou-se que os anos em que a banda dupla da ZCIT surgiu em, pelo menos, mais de dois dias corresponderam a anos de maiores índices de precipitação.

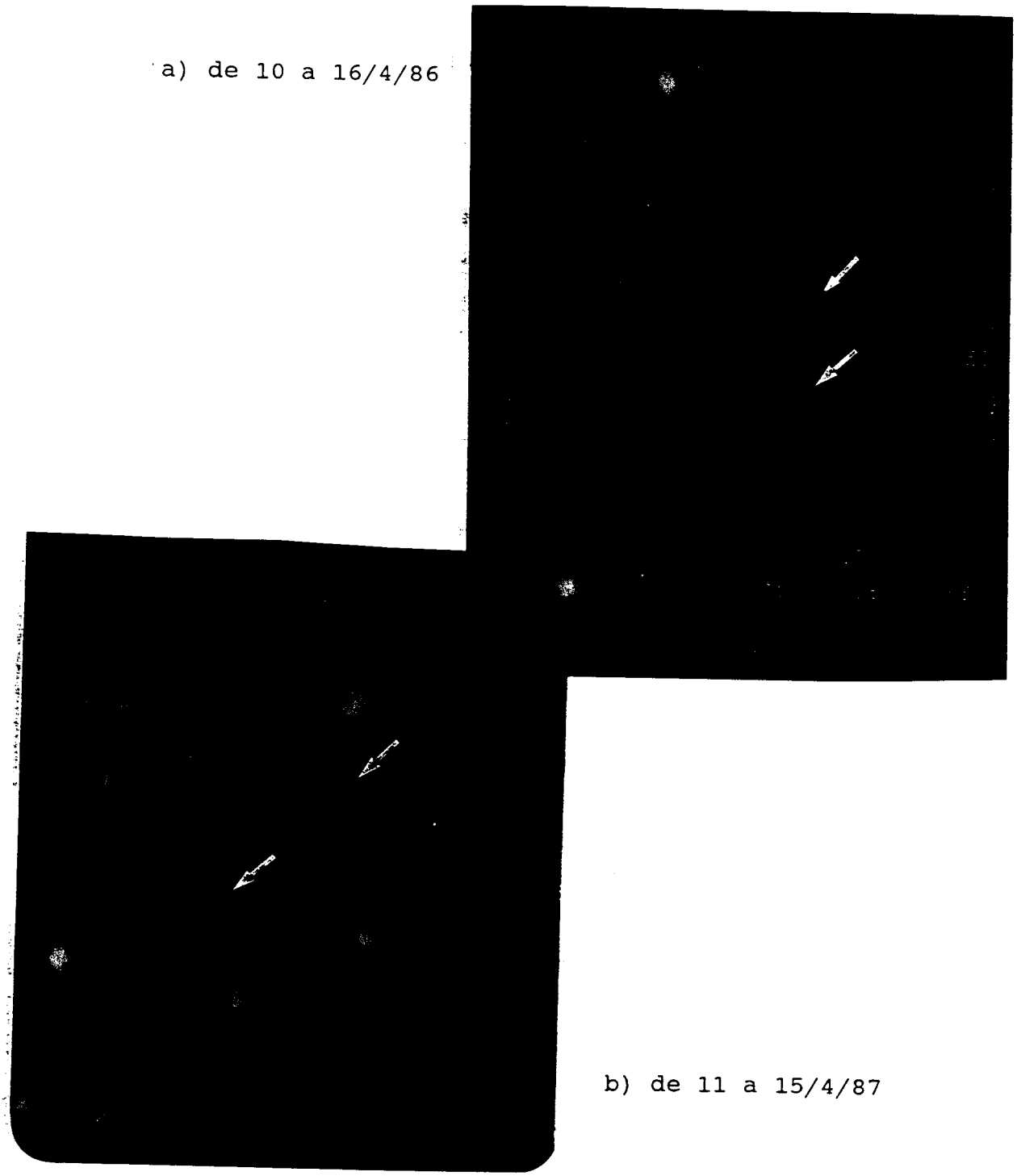
É interessante ressaltar que a banda dupla foi observada com maior facilidade ao longo de 35°W onde a influência da convecção proveniente do continente sul-americano é menor. Ao longo de 40°W pode-se ainda observar a banda dupla, porém, com menor freqüência devido à influência continental; ao longo de 45°W, já é muito difícil observá-la, pois se encontraria sempre sobre o continente.

Dois exemplos do fato acima descrito podem ser vistos nas Figura 4.12 , que são imagens síntese METEOSAT para 5 dias. No caso da Figura 4.13a, tem-se um exemplo onde a banda dupla aparece bastante nítida no Atlântico Central até aproximadamente 37°W, não sendo possível distigui-la em 40°W ou 45°W. Na Figura 4.13b, a banda dupla não aparece ao longo de 35°W e não é possível ser determinada ao longo de 45°W devido à convecção sobre o continente, ela só é bem determinada de 37°W a 42°W; portanto, para este estudo, somente pôde ser determinada ao longo de 40°W.

## 4.11 - ISOLINHAS DE PNE PARA ANOS SECOS E CHUVOSOS

Com o objetivo de analisar a distribuição espacial da precipitação sobre o Nordeste foram traçados gráficos de isolinhas relativos à precipitação média para um conjunto de anos secos e de anos chuvosos na região.

a) de 10 a 16/4/86

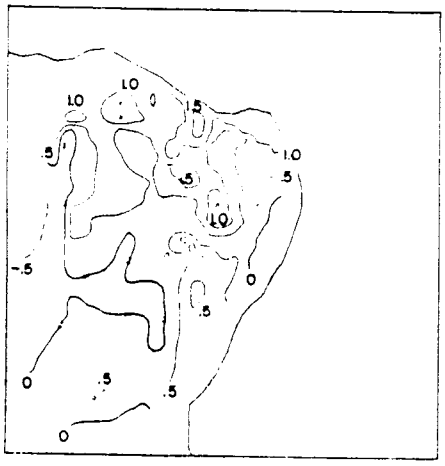


b) de 11 a 15/4/87

Fig. 4.12 - Imagem síntese METEOSAT.

- As temperaturas diminuem do vermelho para o branco. As setas indicam as duas bandas de nebulosidade em cada imagem.

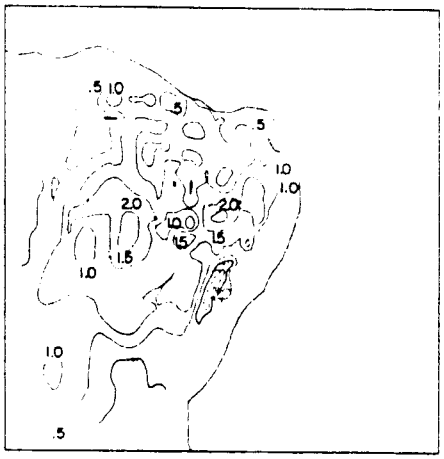
janeiro



fevereiro

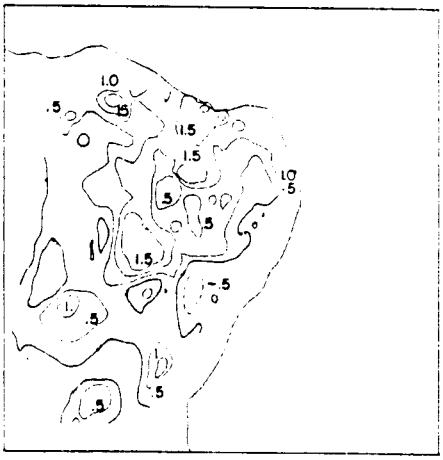
março

abril



maio

junho



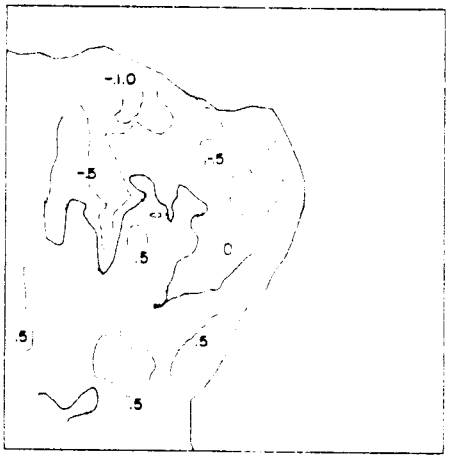
a) anos chuvosos (71, 73, 74, 77, 84, 85)

(continua)

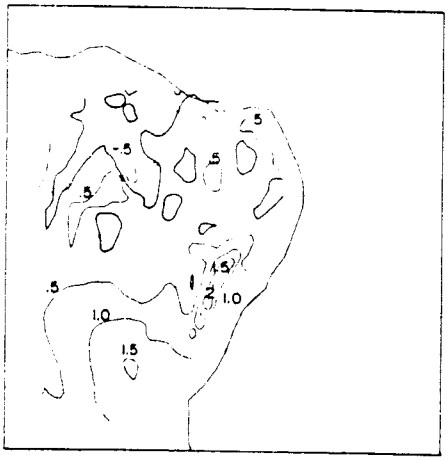
Fig. 4.13 - Isolinhas de desvios padronizados de precipitação sobre o Nordeste.

- Janeiro a junho. Tracejado para valores negativos, linha cheia para positivos e linha em negrito para o zero.

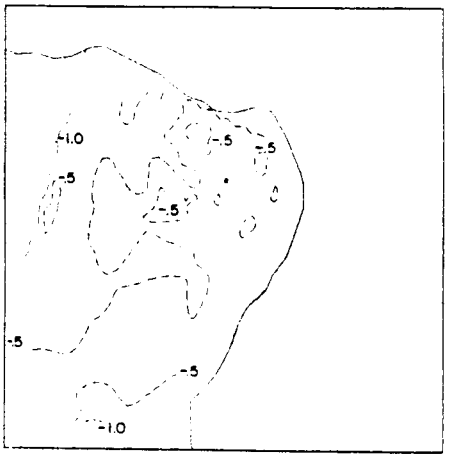
janeiro



fevereiro

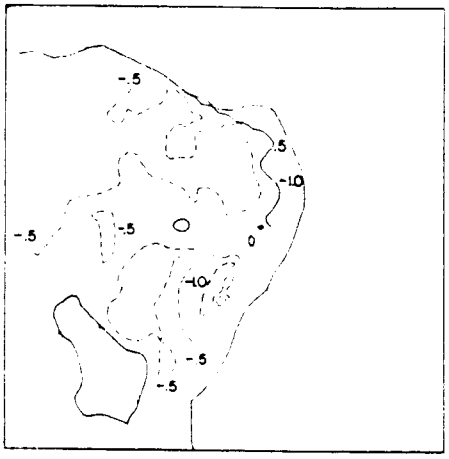


março



abril

maio



junho

b) anos secos (72, 76, 79, 80, 82, 83)

Fig. 4.13 - Conclusão.

Foram plotados em cada estação pluviométrica do Nordeste os desvios padronizados de precipitação calculado através da divisão da anomalia média de precipitação naquela estação em relação à precipitação média climatológica pelo desvio padrão da precipitação na estação (Fig. 4.13).

Notou-se que, tanto nos anos secos como nos chuvosos, a região sul do Nordeste tende a apresentar anomalias de sinal contrário à região norte, principalmente nos meses de janeiro e fevereiro. Em anos secos essa característica tende a desaparecer durante os meses de março e abril, retornando nos dois meses seguintes. Para anos chuvosos ela se mantém até maio, desaparecendo apenas no mês de junho.

Os valores das anomalias variam muito em toda a região, apresentando, por vezes, fortes gradientes, o que já era esperado devido às características da precipitação da região, onde sua distribuição não é uniforme e apresenta grandes áreas com valores de precipitação próximos de zero.

Outro fator que pode influenciar no aparecimento de fortes gradientes é o fato de que foram usados poucos anos para o cálculo das médias (6 para anos secos e 7 para chuvosos); desta forma, um sistema de precipitação isolado pode influenciar a média de forma significativa.

Nota-se que tanto em anos secos como em anos chuvosos existem, espalhadas pela região, áreas de índices de precipitação positivos e negativos, isto é, com precipitação acima e abaixo da média. Porém, em anos chuvosos (secos), os índices positivos (negativos) possuem maiores valores, em módulo, e ocupam uma maior área espacial, de tal forma que um ano será considerado seco ou

chuvoso no Nordeste de acordo com a média espacial da precipitação para todo o Nordeste (de fato, os índices de precipitação de Hastenrath (1986) e Nobre & Paião (1986), através dos quais foram definidos os anos secos e chuvosos, são calculados considerando uma média entre estacões pluviométricas distribuídas por todo o Nordeste).

Foi interessante notar que o mês de fevereiro apresenta uma característica de precipitação diferente da estação chuvosa. Em anos secos, fevereiro apresenta precipitação acima da média para toda a região. Em anos chuvosos, este mês se manteve, em quase toda a região, com valores bem próximos à média.

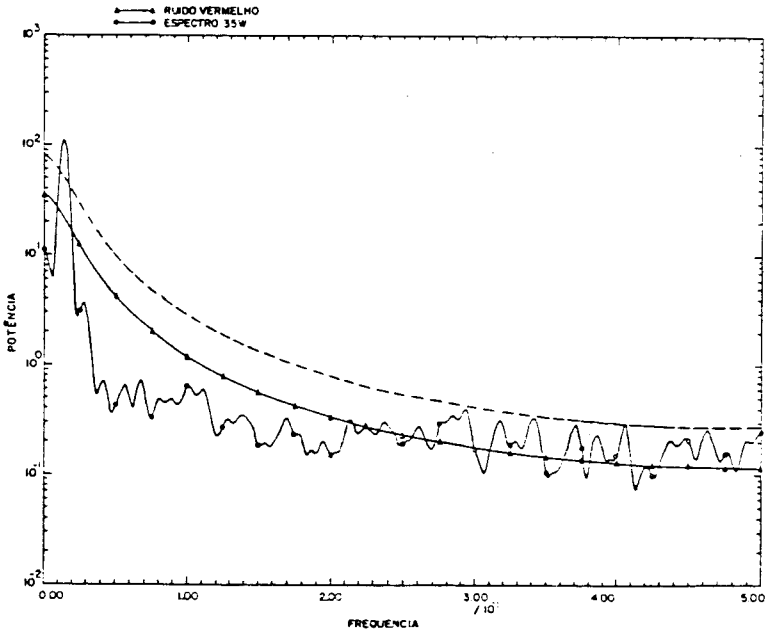
## 4.12 - ESPECTRO DA POSIÇÃO DA ZCIT

Foi calculado o espectro para as três séries de posições da ZCIT em duas situações diferentes:

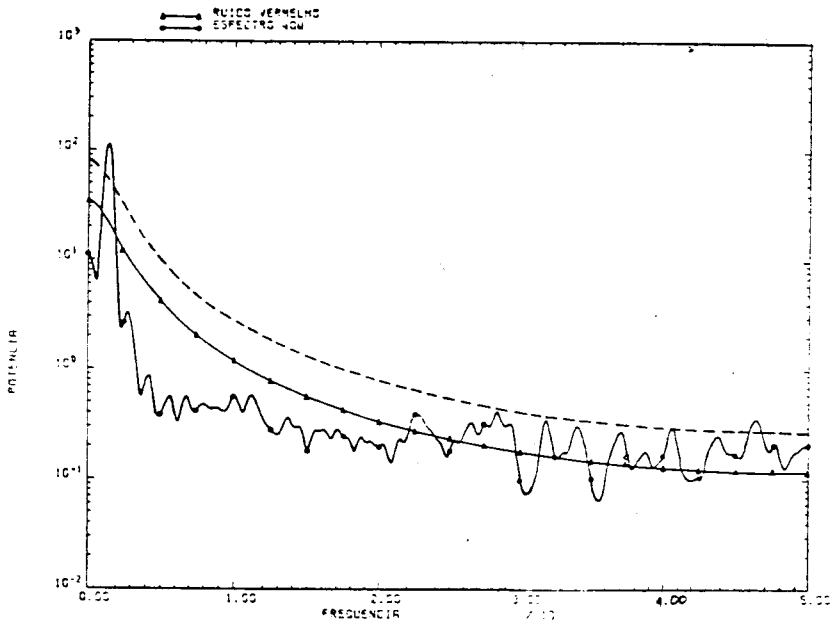
1) as séries originais sem qualquer filtro (Fig. 4.14);
2) as séries originais eliminando a respectiva marcha média anual (Fig. 4.15).

Para calcular o espectro no primeiro caso, foi feita a adaptação das séries de posição da ZCIT atribuindo aos dados faltosos de cada série o valor médio entre as pêntadas anterior e posterior à pêntada em questão.

De posse dessas novas séries (denominadas séries originais), foi determinado o espectro para cada uma delas em separado.




a) 35°W

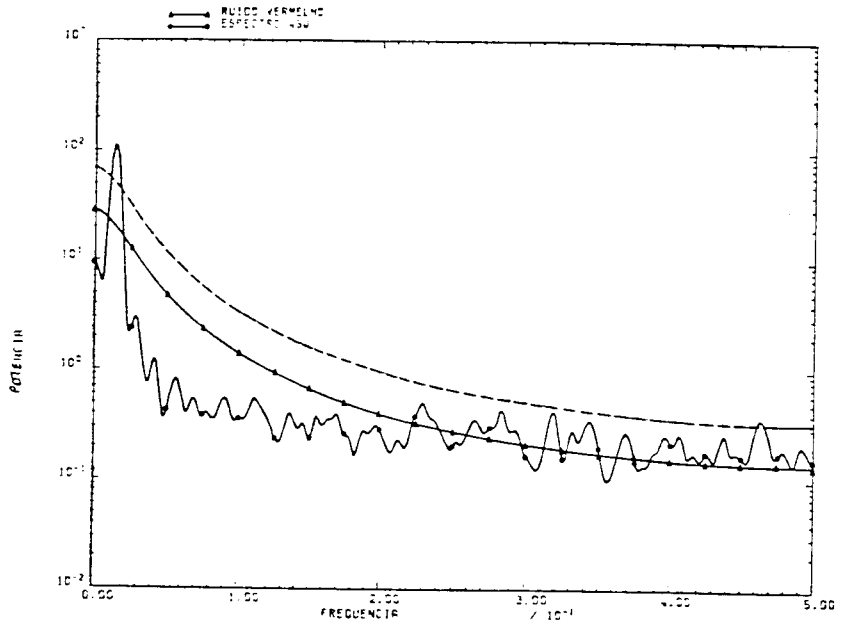



b) 40°W

(continua)

Fig. 4.14 - Espectro da posição da ZCIT I.

- Série original. Linha tracejada para significância estatística de 95%.



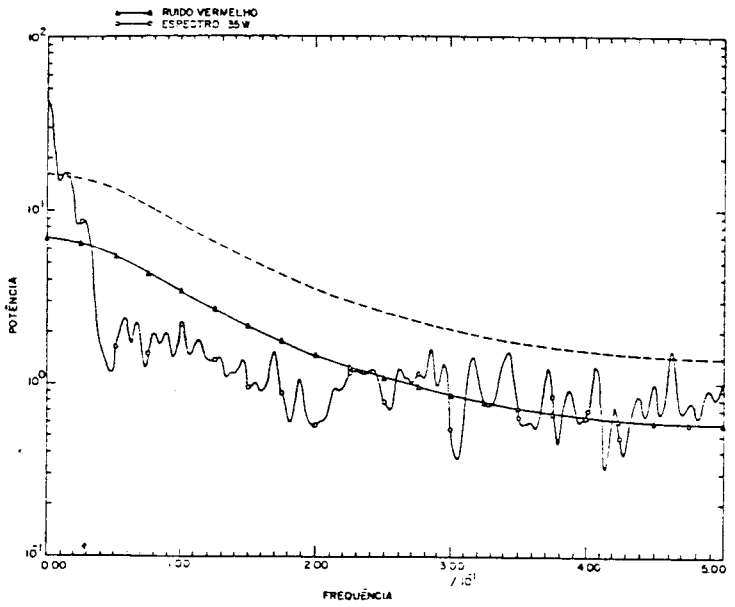

c) 45°W

Fig. 4.14 - Conclusão.

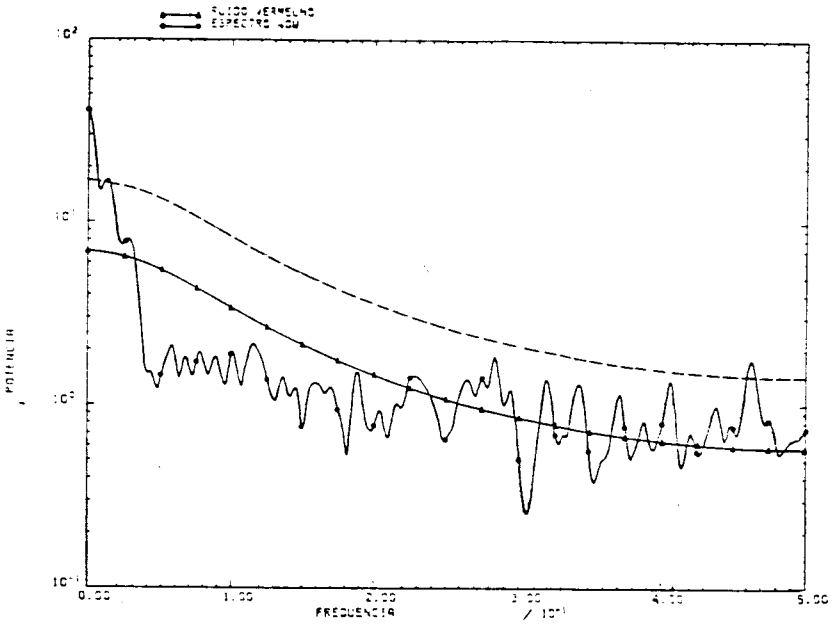
A seguir, foi calculado o espectro para as séries, eliminando delas a respectiva marcha média anual com o objetivo de eliminar do espectro o ciclo anual da ZCIT.

Nas duas situações o espectro foi calculado usando a janela de Parzem segundo Nobre et alii (1982).

Todos os espectros encontrados apresentaram uma distribuição potência/freqüência do tipo ruído vermelho, com maiores valores de intensidade próximo à freqüência zero, diminuindo em direção a freqüências maiores.



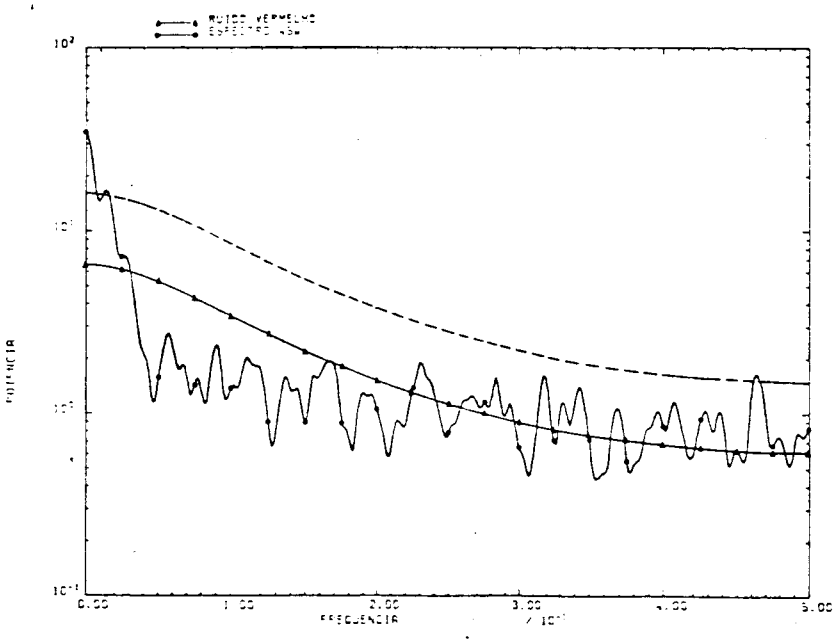

a) 35°W




b) 40°W

Fig. 4.15 - Espectro da posição da ZCIT II.

- Série excluída a marcha média anual. Linha tracejada para significância estatística de 95%.



c) 45°W

Fig. 4.15 - Conclusão.

Como esperado, o espectro para as três séries se mostraram bastante semelhantes, principalmente nas freqüências onde foram observados picos de maior intensidade.

Examinando os espectros resultantes das análises das séries originais (com valores estimados para dados faltosos), notou-se um pico de maior potência com oscilação em torno de um ano (Fig. 4.15), como era de esperar, e um outro pico com oscilação em torno e 11 dias, para as três séries (Fig. 4.14).

Esse pico de maior freqüência parece representativo principalmente de ondas de leste (RENNÓ,1988).

Em seguida, observando os espectros resultantes das séries quando eliminado o ciclo anual, nota-se que se evidencia principalmente o pico de intensidade com oscilação em torno de 11 dias (Fig. 4.15).

Os resultados mostram, então, que a ZCIT apresenta uma influência das ondas de leste (oscilação de 11 dias mostrada em RENNÓ, 1988), o que foi constantemente observado em imagens de satélite por ocasião das análises para a determinação das séries de dados da posição da ZCIT.

# CAPÍTULO 5
# SUMÁRIO E CONCLUSÕES

Este trabalho procurou aprofundar o conhecimento existente entre a relação de variáveis meteorológicas e oceânicas sobre o Atlântico Tropical, tais como a tensão de cisalhamento superficial zonal e meridional, temperatura da superfície do mar e posição latitudinal das Zona de Convergência Intertropical e da Zona de Confluência dos Alísios, com as anomalias de precipitação sobre o Nordeste do Brasil. Construíram-se séries da posição latitudinal da banda de máxima atividade convectiva sobre o Atlântico Tropical (aqui definida como a posição da ZCIT) para várias longitudes, no período de 1971 a 1987, e relacionaram-se os movimentos da ZCIT com flutuações nas chuvas do Nordeste nas escalas intra-sazonal, sazonal e interanual.

Verificou-se que anomalias positivas (negativas) de TSM sobre o Atlântico Tropical Sul, de outubro a janeiro, apresentam maiores correlações com anomalias positivas (negativas) da estação chuvosa (março, abril e maio) no Nordeste, ao passo que anomalias de TSM negativas (positivas) sobre o Atlântico Tropical Norte relacionam-se melhor com anomalias positivas (negativas) de precipitação do Nordeste de fevereiro a abril. Ainda sobre a TSM, notou-se que as regiões próximas ao centro, e no flanco equatorial, das Altas dos Atlânticos Norte e Sul apresentam a maior "previsibilidade por persistência" em relação à precipitação do Nordeste do Brasil, porém esta previsibilidade estende-se apenas por alguns meses (2 a 3 meses) e é bem menor do que a persistência das TSMs no Pacífico Tropical, que é de mais de 6 meses em média. Os ventos alísios se mostraram bem correlacionados com a precipitação, o que mostra que, numa faixa entre aproximadamente $0^{o}$ e $10^{o}$N, o enfraquecimento dos alísios

está ligado à maior precipitação no Nordeste e que, fora dessa faixa, o fortalecimento (enfraquecimento) dos alísios de NE e enfraquecimento (fortalecimento) dos alísios de SE se relacionam com maior (menor) precipitação durante a estação chuvosa no Nordeste. Essas conclusões mostram-se de acordo com as encontradas por Hastenrath & Heller (1977) e Servain & Seva (1987).

Quanto à relação entre a posição da ZCIT e a precipitação no Nordeste, as análises feitas indicam que, apesar de não haver muita previsibilidade na posição da ZCIT antes da estação chuvosa do Nordeste, é observável que a ZCIT se localiza ligeiramente mais ao sul para anos chuvosos do que para anos secos em janeiro e fevereiro. Entretanto, isto é de pouca utilidade para previsão, pois essa diferença é pequena e menor que o erro na determinação da posição da ZCIT. No entanto, as médias da posição da ZCA para anos secos e chuvosos mostra uma separação, em janeiro e fevereiro, muito maior; portanto, o campo de vento pode antecipar qual será o comportamento da ZCIT de forma muito melhor do que a ZCIT propriamente dita. Isto se deve provavelmente ao fato de a ZCIT estar diretamente ligada a um sistema convectivo que apresenta grande variabilidade nas escalas de dias e semanas. A posição do eixo de confluência dos alísios, por outro lado, quando tomado como média mensal, reflete a circulação atmosférica na escala do Atlântico Tropical e, portanto, com menor variabilidade do que a posição da banda convectiva. Esse fato fica evidente quando se comparam os desvios padrões mensais da posição da ZCIT e da ZCA, sendo este último bem menor. Isto se dá porque as flutuações nos ventos na escala do Atlântico são lentas e ligadas à circulação geral da atmosfera e às condições de fronteira inferior, isto é, as TSMs, as quais também variam lentamente.

está ligado à maior precipitação no Nordeste e que, fora dessa faixa, o fortalecimento (enfraquecimento) dos alísios de NE e enfraquecimento (fortalecimento) dos alísios de SE se relacionam com maior (menor) precipitação durante a estação chuvosa no Nordeste. Essas conclusões mostram-se de acordo com as encontradas por Hastenrath & Heller (1977) e Servain & Seva (1987).

Quanto à relação entre a posição da ZCIT e a precipitação no Nordeste, as análises feitas indicam que, apesar de não haver muita previsibilidade na posição da ZCIT antes da estação chuvosa do Nordeste, é observável que a ZCIT se localiza ligeiramente mais ao sul para anos chuvosos do que para anos secos em janeiro e fevereiro. Entretanto, isto é de pouca utilidade para previsão, pois essa diferença é pequena e menor que o erro na determinação da posição da ZCIT. No entanto, as médias da posição da ZCA para anos secos e chuvosos mostra uma separação, em janeiro e fevereiro, muito maior; portanto, o campo de vento pode antecipar qual será o comportamento da ZCIT de forma muito melhor do que a ZCIT propriamente dita. Isto se deve provavelmente ao fato de a ZCIT estar diretamente ligada a um sistema convectivo que apresenta grande variabilidade nas escalas de dias e semanas. A posição do eixo de confluência dos alísios, por outro lado, quando tomado como média mensal, reflete a circulação atmosférica na escala do Atlântico Tropical e, portanto, com menor variabilidade do que a posição da banda convectiva. Esse fato fica evidente quando se comparam os desvios padrões mensais da posição da ZCIT e da ZCA, sendo este último bem menor. Isto se dá porque as flutuações nos ventos na escala do Atlântico são lentas e ligadas à circulação geral da atmosfera e às condições de fronteira inferior, isto é, as TSMs, as quais também variam lentamente.

Conclui-se então que, em relação à ZCIT, é a permanência mais longa ou mais curta desta em torno de suas posições mais ao sul o fator mais importante na determinação da qualidade da estação chuvosa do norte do Nordeste, pois determina a duração da estação chuvosa. Quando a ZCIT inicia sua migração para o norte em fins de fevereiro ou início de março, as chuvas são, em geral, deficientes. Por outro lado, se a ZCIT somente iniciar sua migração para o norte em fins de abril ou início de maio, as chuvas serão, provavelmente, abundantes.

Desta forma, pôde-se concluir que um aspecto importante para prever a qualidade da estação chuvosa é prever quando a ZCIT iniciará seu retorno para o norte após ter atingido sua posição mais ao sul. Adicionalmente, este estudo mostrou que os deslocamentos da ZCIT nos meses que antecedem a estação chuvosa não parecem estar muito bem relacionados com a qualidade da estação chuvosa, a não ser pelo fato de que um deslocamento da ZCIT ao sul de sua posição normal no mês de janeiro pode acarretar um início antecipado da estação chuvosa.

As análises chamam também a atenção para a importância de variações intra-sazonais da precipitação do Nordeste. Parece ser igualmente importante prever as variações intra-sazonais e as variações interanuais para determinar o fim da estação chuvosa, mesmo em anos com precipitação próxima da normal.

Em outras palavras, o estudo das posições e migrações da ZCIT indica preliminarmente que há, aparentemente, uma relação entre as variações intra-sazonais e interanuais, isto é, a precipitação no início da estação chuvosa (fevereiro e março) está relativamente pouco correlacionada com o total pluviométrico da estação chuvosa como um todo. É a duração da estação que irá

determinar se uma dada estação chuvosa será abundante ou escassa. É interessante constatar que a ocorrência de interrupção da estação chuvosa no Nordeste apresenta similaridades com a interrupção das chuvas monçonais sobre a Índia e Sudeste Asiático. Nos dois casos, há mudança abrupta na posição das zonas de convergência na escala de poucas semanas. Para o Nordeste a estação chuvosa pode iniciar-se normal ou até chuvosa em fevereiro e março e encerrar-se abruptamente em março e abril, a exemplo do que ocorreu durante a estação chuvosa de 1987.

A banda dupla da ZCIT, que ocasionalmente é observada, mostrou-se relacionada com anos chuvosos, porém a causa de seu aparecimento não foi detectada, causa esta que pode ser objeto de estudo mais ainda aprofundado.

Não detectada, também, foi a causa do aparecimento dos "saltos" da ZCIT de fevereiro e março. Isso se deveu, entretanto, à diferença entre as escalas de tempo dos "saltos" (de 10 a 15 dias) e dos dados de tensão de cisalhamento superficial e TSM, que são mensais.

As análises espectrais das séries de posição da ZCIT indicam que a ZCIT aparentemente apresenta flutuações na escala de tempo de 11 dias. Estas flutuações podem ser causadas por propagação de ondas de leste, porém esses são distúrbios de oscilação de dezenas de dias e não parecem influenciar a qualidade da estação chuvosa do Nordeste como um todo. Uma suposição, entretanto, é que os "saltos" de fevereiro e março estejam, de alguma forma, ligados à influência dessas ondas sobre a ZCIT.

Em linhas gerais, os resultados encontrados confirmaram os resultados anteriores obtidos por Hastenrath & Heller (1977), Hastenrath & Lamb (1977), Markham & McLain (1977), Moura & Shukla (1981), Oliveira (1981), Saha

(1981), Chung (1982), Hastenrath et ali (1984) e Servain & Seva (1987) de que o fortalecimento da Alta do Atlântico Norte (conseqüentemente dos alísios de NE) e o enfraquecimento da Alta do Atlântico Sul (conseqüentemente dos alísios de SE) e anomalias positivas de TSM no Atlântico Tropical Sul e negativas no Atlântico Tropical Norte se relacionam com anos chuvosos no Nordeste e o contrário com anos secos. Esclareceu-se, porém o fato de que essas características não levam a ZCIT a posições significativamente mais ao sul que a normal antes ou no início da estação chuvosa na maioria dos casos, mas sim, mantêm a ZCIT em torno de suas posições mais austrais durante maior tempo, causando um prolongamento da estação chuvosa, o que irá resultar num ano chuvoso.

Ainda, uma vez estabelecida uma estação seca ou chuvosa no Nordeste, nota-se que, ao menos em anos extremamente secos ou chuvosos, existem tanto regiões com precipitação abaixo da média quanto regiões com precipitação acima da média sobre a área do Nordeste, de tal forma que é a predominância de regiões com precipitação acima ou abaixo da média que define a qualidade da estação chuvosa como um todo. Esta informação pode ser muito útil em anos secos, pois o transporte de água, por meios viáveis, das regiões que apresentam precipitação para as regiões de maior necessidade poderia amenisar as situações social e econômica críticas que se estabelecem na região durante esses anos.

Apesar de este trabalho ter se concentrado quase que exclusivamente nas anomalias de circulação no setor do Atlântico em suas relações com a precipitação no Nordeste, é importante ressaltar que a forte interação existente entre a atmosfera e o Oceano Pacífico Tropical, isto é, a Oscilação Sul, também influencia de maneira marcante o regime de chuvas daquela região. Um assunto para

futuras pesquisas é o estudo de como episódios intensos de El Niño-Oscilação Sul, ou a fase oposta, Anti-El Niño, afetam as circulações sobre o Atlântico Tropical.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BUCHMANN, J. **Um estudo sobre e a influência de fenômenos meteorológicos extratropicais na variação do clima do Nordeste brasileiro.** Tese de doutorado em Engenharia. Rio de Janeiro, UFRJ, jul. 1981.

CITEAU, J; CAMMAS, J.P.; GOURIOU, Y.; GUILLOT, B. Questions about the ITCZ migration over the Tropical Atlantic, sea surface temperature in the Gulf of Guinea and the flow of Senegal River. **CCCO Meeting**, Rio de Janeiro, Sept. 9 -13, 1985.

CITEAU, J.; BERGÉS, J.C.; DEMARCQ, H.; MAHÉ, G. Position de la Zone de Convergence a 28°N et température de surface de l'ocean. **Veille Climatique Satellitaire**, sv(21):3-7, 1988a.

_____ The watch of ITCZ migrations over tropical Atlantic as an indicator in drought forecast over Sahelian area. **Ocean-Atmosphere Newsletter**, sv(45):1-3, Ago. 1988b.

CHUNG,J.C. Correlations between the Tropical Atlantic trade winds and precipitation in northeast Brazil. **Journal of Climatology**, 2(1):35-46, 1982.

ESTOQUE, M.A.; DOUGLAS, M. Structure of the Intertropical Convergence Zone over the GATE area. **Tellus**, 30(1):55-61, 1978.

HASTENRATH,S. **Índices padronizados de precipitação para a região norte do nordeste do Brasil.** São José dos Campos, 1986. Comunicação pessoal a Cíntia Regina Bertacchi Uvo.

HASTENRATH, S. Interannual variability and annual cycle: mechanisms of circulation and climate in the tropical Atlantic sector. **Monthly Weather Review**, 112(6):1097-1107, 1984.

HASTENRATH, S. On Modes of tropical circulation and climate anomalies. **Journal of the Atmospheric Science**, 35(12):2222-2231, 1978.

HASTENRATH, S.; HELLER, L. Dynamics of climatic hazards in Northeast Brazil. **Quartely Journal of the Royal Meteorological Society**, 103(435):77-92, 1977.

HASTENRATH, S.; LAMB, P. Some aspects of circulation and climate over the eastern equatorial Atlantic. **Monthly Weather Review**, 105(8):1019-1023, 1977.

HASTENRATH, S.; WU, M.C.; CHU, P.S. Towards the monitoring and prediction of north-east Brazil droughts. **Quartely Journal of the Royal Meteorological Society**, 110:411-425, 1984.

LAMB, P. Large-scale tropical Atlantic circulation patterns associated with Subsaharan weather anomalies. **Tellus**, 30(3):240-251, 1978b.

MARKHAM, C.G.; McLAIN, D.R. Sea surface temperature related to rain in Ceara, north-eastern Brazil. **Nature**, 256(5592):320-323, 1977.

MOURA, A.D.; SHUKLA, J. On the dynamics of the droughts in Northeast Brazil: Observations, theory and numerical experiments with a general circulation model. **Journal of the Atmospheric Science**, 38(12):2653-2673, 1981.

NAMIAS, J. Influence of Northern hemisphere general circulation on drought in Northeast Brazil, **Tellus**, 24(4):336-342, 1972.

NOBRE, C.A.; PAIÃO, L.B.F.C. Índice de precipitação para o Nordeste. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA,4; Brasília, 20 - 24 de out. 1986. Anais.

NOBRE, C.A.; YANASSE, H.H.; YANASSE, C.C.F. **Previsão de secas no nordeste pelo método das periodicidades: usos e abusos.** São José dos Campos, INPE, 1982. (INPE-2344-RPE/407).

NOBRE, P.; NOBRE, C.; MOURA, A.D. **Large-scale circulation anomalies and prediction of Northeast Brasil drought.** São José dos Campos, INPE, Feb. 1985. (INPE-3405-PRE/674).

OLIVEIRA, L.L. **Zonas de Convergência no Atlântico sul e suas influências no regime de precipitação no nordeste do Brasil.**Dissertação de mestrado em Meteorologia. São José dos Campos, INPE, 1982. (INPE-2307-TDL/074).

PICAUT, J.; SERVAIN, J.; LECOMTE, P.;SEVA, S.; ROUGIER, G. **Climatic atlas of the tropical Atlantic wind stress and sea surface temperature 1964-1979.** Hawaii, Université de Bretagne Occidentale/University of Hawaii, 1985. 467p.

PIKE, A.C. Intertropical Convergence Zone studied with an interacting atmosphere and ocean model. **Monthly Weather Review,** 99(6):469-477, 1971.

RAO, V.B.; MARQUES, V.S. Water vapor characteristics over Northeast Brazil during two contrasting years. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, 23(6):440-444, 1984.

RENNÓ, N.O. **The Madden-Julian Oscillation (MJO) in the tropical atmosphere.** Thesis proposal. Boston, MIT, 1988.

SAHA, K. Mean cloud distributions over tropical oceans **Tellus**, 23(2):183-194, 1981.

SERVAIN, J. **Correlações entre a TSM, tensão superficial de cisalhamento.de vento sobre o Atlântico tropical e a precipitação no Nordeste do Brasil.** São José dos Campos, 1987. Comunicação pessoal a Cíntia Regina Bertacchi Uvo.

SERVAIN, J.; SEVA, M. On relationships between Tropical Atlantic sea surface temperature, wind stress and regional precipitation indices: 1964-1984. **Ocean Air Interactions**, 1(sf):183-190, 1987.

SERVAIN, J.; SEVA, M.; LUKAS, S.; ROUGIER, G. Climatic atlas of the Tropical Atlantic wind stress and sea surface temprature 1980-1984. **Ocean - Air Interactions**, 1(sf):109-182, 1987.

SIKKA, D.R.; GADGIL, S. On the maximum cloud zone and the ITCZ over indian longitudes during the Southwest monsoon. **Monthly Weather Review**, 108(11):1840-1853, 1980.

WRIGHT, P.B. Predictability of SST anomalies in the Equatorial Atlantic. **Tropical Ocean-Atmosphere Newsletter,** sv(31):4-5, 1985.