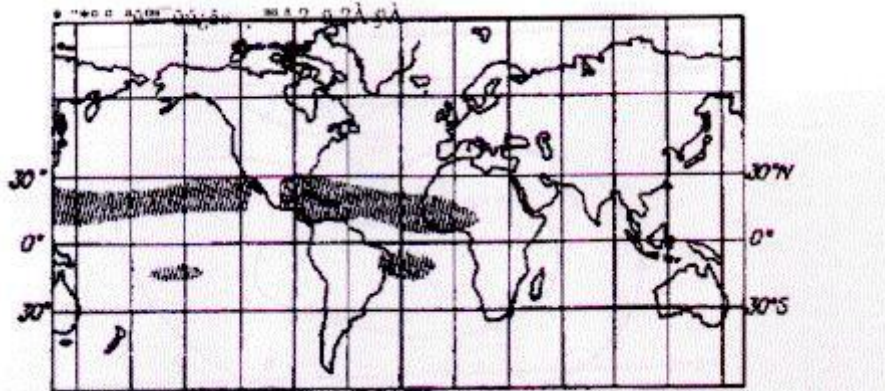


## Ondas de leste

### Descoberta

As ondas de leste foram descobertas logo após o início da confecção regular de cartas de tempo para a região equatorial (Índia, 1875).



*Figura 1:* Regiões onde observa-se ou há indícios de propagação das ondas de leste.  
Fonte: Berry *et al* (1945).

Até o final do século XIX, estava bem estabelecido que durante os meses de Junho a Setembro, centros de baixa pressão vindos de leste cruzavam o continente e adentravam na Baía de Bengala, ajudando na formação de depressões monçônicas no norte da baía (estas depressões são famosas por sua alta energética e pelos distúrbios induzidos no oceano e conseqüentemente nas regiões costeiras como Bangladesh).

Além disso, em períodos pré e pós-monções, suspeitava-se que os ciclones tropicais da Baía de Bengal eram remanescências de distúrbios oriundos do Mar da China e Pacífico Oeste Central; em 1936 foram publicadas cartas que indicavam a trajetória de ciclones originados no Pacífico, a oeste de 150°E e que se moviam para a região da Índia.

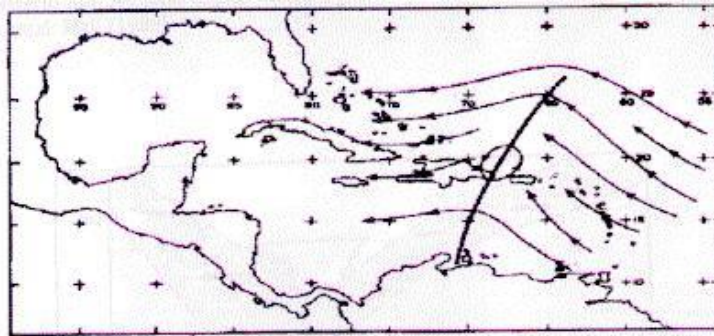
Nesta mesma época se reconhecia alguns padrões semelhantes em outras regiões tropicais, como a costa oeste da África e o Atlântico Leste.

Do ponto de vista observacional, Riehl (1945) foi o primeiro a fornecer uma estrutura 3D detalhada destes distúrbios no Mar do Caribe, consagrando a idéia de que as ondas de leste ocorrem em toda a região tropical e que sua estrutura varia de uma região para outra.

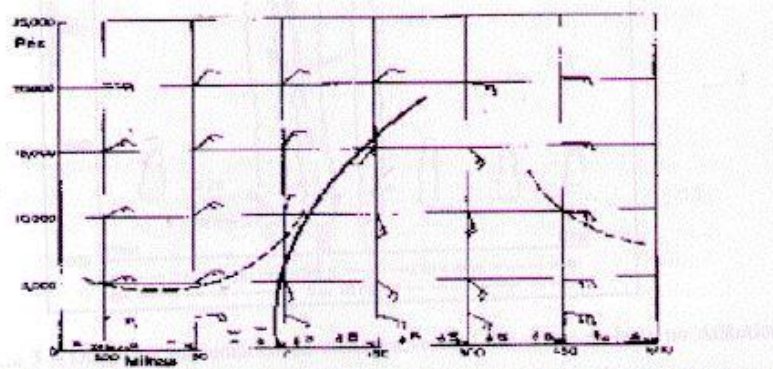
Apesar de os alísios estarem relacionados com condições de tempo estáveis, em algumas regiões dos trópicos estas situações tranquilas são interrompidas por distúrbios que por se moverem com os alísios para oeste e apresentarem configurações ondulatórias nos campos de vento e pressão, são chamados Ondas de Leste. Segundo Berry *et al.* (1945), estes distúrbios ocorrem em diversas partes dos trópicos (figura abaixo), sendo que estudos extensivos têm sido realizados no Atlântico Tropical Norte (ATN), no Caribe e na região do Pacífico Tropical Oeste (PTO).

O modelo clássico de descrição das ondas de leste foi desenvolvido por Riehl (1954) na região do Caribe. Riehl foi o primeiro a fornecer uma descrição 3-D detalhada dessa onda. Segundo ele, as ondas de leste são oscilações nos campos de pressão e vento, que se encontram em fase na superfície. O cavado estende-se em direção ao pólo; possui orientação NE-SW no HN (Figura 2); e inclina-se para leste com a altura (figura 3). Na dianteira do cavado, há divergência e movimento subsidente nos baixos níveis, com características de bom tempo; e na retaguarda há convergência

nos baixos níveis com predominância de forte movimento ascendente e convecção profunda.



*Figura 2:* Modelo de ondas de leste: linha de corrente em 4500m. Inclinação horizontal do eixo do cavado de NE-SW. Fonte: Riehl (1954).



*Figura 3:* Modelo de ondas de leste: secção vertical do vento em 15°N. Profundidade da camada úmida (linha tracejada). Inclinação do eixo do cavado para leste. Fonte: Riehl (1954).

### **Dificuldades no estudo das ondas de leste**

#### Relativa sutileza em intensidade:

A amplitude das ondas de leste migratórias é bem menor do que os cavados e cristas nas latitudes tropicais, não sendo facilmente identificáveis em cartas sinóticas; assim é necessária uma análise especial para detectá-las.

### Ausência de uma estrutura uniforme:

As ondas de leste estão imersas no escoamento zonal, que por sua vez, apresenta estruturas distintas de região para região e de estação para estação.

### Ausência de dados nos trópicos:

Grande parte dos trópicos é coberta por oceanos, sobre os quais é difícil estabelecer observações freqüentes; mesmo sobre os continentes, não há uma rede considerável de observações.

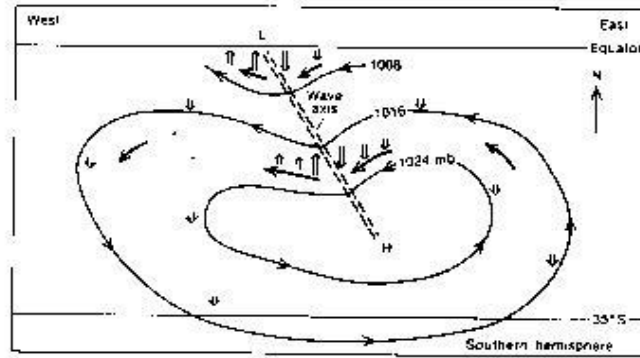
## **Métodos de estudo**

### Estudos de caso com cartas sinóticas:

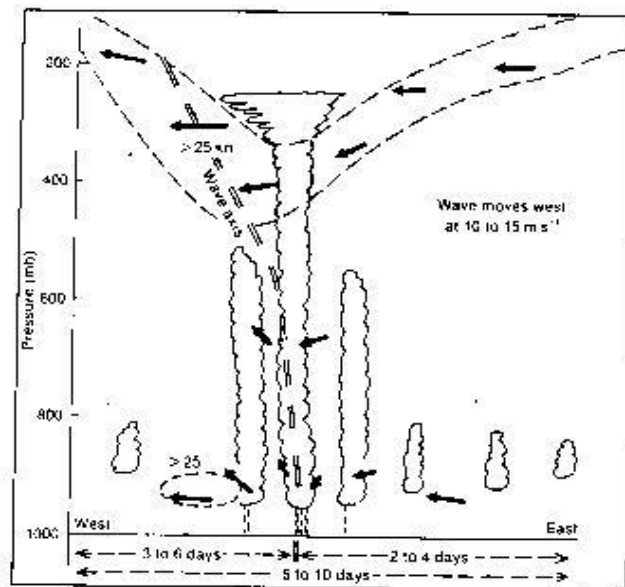
A partir do estudo de alguns casos típicos, os meteorologistas sinóticos fazem uma generalização a respeito das propriedades destes sistemas sinóticos.

### Análises de imagens de satélite e ar superior:

Hall (1989) sugeriu que através de imagens de satélites e seções temporais de vento de altos níveis, no início de 1986, que características similares às ondas de leste no HN afetariam a ilha de Ascensão, localizada no ATS; e que provavelmente tais distúrbios dispararam fortes sistemas precipitantes no período de suas passagens. Hall sugeriu também que a origem destes distúrbios estava na região da África Central. (Figuras 4 e 5).



*Figura 4:* Diagrama esquemático da estrutura em baixos níveis das ondas de leste no HS. As setas duplas indicam o movimento vertical e as negras o escoamento horizontal. Fonte: Hall (1989).



*Figura 5:* Diagrama esquemático da estrutura vertical das ondas de leste no Atlântico Tropical Sul. Fonte: Hall (1989).

#### Composição de cartas analisadas:

Através de um mosaico de situações para determinado cinturão de latitude, é possível identificar o comprimento de onda e a velocidade de propagação típicos.

### Análise espectral:

A partir de séries temporais de parâmetros meteorológicos (vento, temperatura, umidade, etc) obtidas em determinada estação, as técnicas de análise espectral podem extrair importantes informações sobre períodos e correspondentes amplitudes.

Apresenta a vantagem de avaliar detalhes, o que não pode ser feito com cartas sinóticas; além disso, estações relativamente distantes podem ser analisadas independentemente, o que não é possível com cartas.

### Simulação dinâmica:

A partir das considerações obtidas com as técnicas anteriores, é possível avaliar a importância relativa entre os diversos termos das equações do movimento (análise de escala); essas equações podem ser integradas no tempo de modo a fornecer características detalhadas das perturbações.

### **Características regionais das ondas de leste durante o verão do HN**

As ondas de leste existem na região tropical de ambos os hemisférios; no entanto, são mais marcadas durante o período junho-setembro no HN e são mais estudadas no HN.

- No Pacífico Oeste Central, as ondas de leste se originam como fracos sistemas de baixa pressão, perto da ZCIT, crescendo para depressões tropicais e ocasionalmente para tufões que afetam as Filipinas, sul do Mar da China, Vietnã, sudeste da China e Japão.
- Estas ondas cruzam Vietnã, Tailândia e Burma e atingem a Baía de Bengal, na qual em condições favoráveis, podem propiciar a formação das depressões monçônicas.

- Cruzam a Índia e seguem para o Golfo Pérsico leste e se enfraquecem na porção oeste do golfo.
- Novamente podem ser detectadas sobre o norte da África, a oeste de  $30^{\circ}\text{E}$ , e se intensificam à medida que se movem para oeste, atingindo seu máximo aproximadamente em  $05^{\circ}\text{W}$ .
- Cruzando a costa oeste africana, adentram no Atlântico enfraquecendo-se e movendo-se sobre o Atlântico Central e Atlântico Oeste; nesta região são geralmente intensificadas e propiciam o desenvolvimento dos furacões que afetam o Golfo do México e costa sudeste dos EUA.

#### No Pacífico Oeste Central:

- Comprimento de onda: 3500-4000 km; decai à medida que se move para oeste.
- Período: 4 a 5 dias.
- Velocidade de propagação: 10 m/s; decai à medida que se move para oeste.
- Latitude da perturbação máxima: perto da ZCIT.
- Inclinação horizontal: sudoeste-nordeste ao norte do equador e noroeste-sudeste ao sul do equador (transporte de momento para oeste, em ambos os lados do equador).
- Inclinação vertical: no extremo leste (oeste) da região, inclina para leste (oeste) com a altura; uma média em toda a região indicaria pouquíssima ou nenhuma inclinação.
- Nuvens e precipitação: apresentam-se concentradas nos extremos da região.

- Aquecimento diabático: cerca de 8 K/dia em 400hPa e 1 K/dia em 200hPa e 900hPa.

#### Sobre a Índia:

- Comprimento de onda: ~2000 km.
- Período: 5 a 6 dias.
- Velocidade de propagação: 4,3 m/s.
- Inclinação horizontal: norte-nordeste sul-sudoeste.
- Inclinação vertical: o cavado da onda se inclina levemente para leste com a altura à medida que a onda se aproxima da Baía de Bengal.
- Nuvens e precipitação: predominantemente a oeste da linha do cavado.
- Aquecimento diabático: cerca de 10 K/dia com máximo na alta troposfera.

#### No norte da África:

Difícilmente detectáveis a leste de 30°E, gradualmente intensificam-se e atingem máxima amplitude antes de cruzar a costa oeste da África; existem mudanças, mas na média:

- Comprimento de onda: ~2500 km.
- Período: 3,5 dias.
- Velocidade de propagação: ~8 m/s.
- Inclinação horizontal: sudoeste-nordeste na baixa troposfera.
- Inclinação vertical: inclina para leste com a altura na zona de cisalhamento abaixo de 700 hPa.



- Nuvens e precipitação: ao norte de  $12,5^{\circ}\text{N}$  ocorre máximo de nebulosidade e precipitação adiante do cavado da onda; ao sul, ocorrem máximos no eixo do cavado e também um pouco adiante.

#### Sobre o Caribe:

- Comprimento de onda: ~2000 km.
- Período: ~4 dias.
- Velocidade de propagação: ~6 m/s.
- Inclinação horizontal: norte-nordeste sul-sudoeste.
- Inclinação vertical: o cavado da onda se inclina para leste em níveis baixos e médios.
- Nuvens e precipitação: os máximos tendem a ocorrer a leste da linha do cavado, mas bem próximo a ele.

#### Sobre o Pacífico Leste:

- Extensão vertical: muito rasas, com máxima intensidade em 850 hPa, sendo frias até 1,5 km e quentes acima deste nível.
- Comprimento de onda: ~3000-3500 km.
- Período: 4 a 6 dias.
- Velocidade de propagação: 5-7 m/s.
- Inclinação horizontal: nordeste-sudoeste.
- Posição das nuvens: máxima nebulosidade no cavado ou levemente atrás dele, mas a nebulosidade é pequena em todos os casos.

No HS também ocorrem ondas de leste, sendo que são mais marcantes durante o verão do HS, nas vizinhanças da ZCIT no Pacífico Oeste Central,

no norte da Austrália e no Índico Sul; são elas que propiciam a formação de tempestades e ciclones nos lugares citados.

Durante o verão do HS, existe outro cavado “equatorial” situado alguns graus ao norte do equador; as ondas de leste associadas à ZCIT (que ocorrem um pouco ao sul do equador) muitas vezes interagem com estes cavados formando distúrbios meteorológicos significativos (Malasia, Baía de Bengal); além disso, as famosas chuvas associadas às monções do nordeste também se intensificam nestes meses, devido à interação com as ondas de leste.

### **Energética das ondas de leste de escala sinótica**

Consideram-se 5 possíveis fontes de energia para as ondas de leste:

- Instabilidade barotrópica: instabilidade barotrópica do tipo Rayleigh-Kuo aparecem como fortes contribuintes no estágio de desenvolvimento inicial.
- Instabilidade baroclínica com processos adiabáticos secos: trata-se da maior fonte de energia das ondas de leste abordadas.
- CISK: acredita-se que seja uma importante fonte de energia após o estágio inicial de desenvolvimento.
  - Neste ponto vale fazer o seguinte comentário: se existir um mecanismo que levante uma parcela de ar, por um processo adiabático seco, desde a superfície até o nível de condensação ou mesmo até o nível de convecção livre, então a instabilidade convectiva ou instabilidade potencial ou instabilidade condicional do primeiro tipo (CIFK) vai implicar no crescimento de perturbações na escala de nuvens cumulus; sob condições favoráveis, o calor latente liberado na escala de

cúmulos durante este processo de condensação pode implicar em instabilidade dinâmica de grande escala e nestas condições deve ser usada a terminologia instabilidade condicional do segundo tipo (CISK).

- Energia de ondas gravitacionais: ondas inércia-gravitacionais no Lee-side de grandes barreiras orográficas parecem prover condições favoráveis para a geração ou intensificação de ondas de leste.
- Forçantes subtropicais: em alguns casos, os cavados de latitudes médias que alcançam os trópicos podem ocasionar indícios de formação ou intensificação de ondas de leste; mas de qualquer forma, os principais mecanismos de geração e manutenção das ondas de leste situam-se na região tropical.

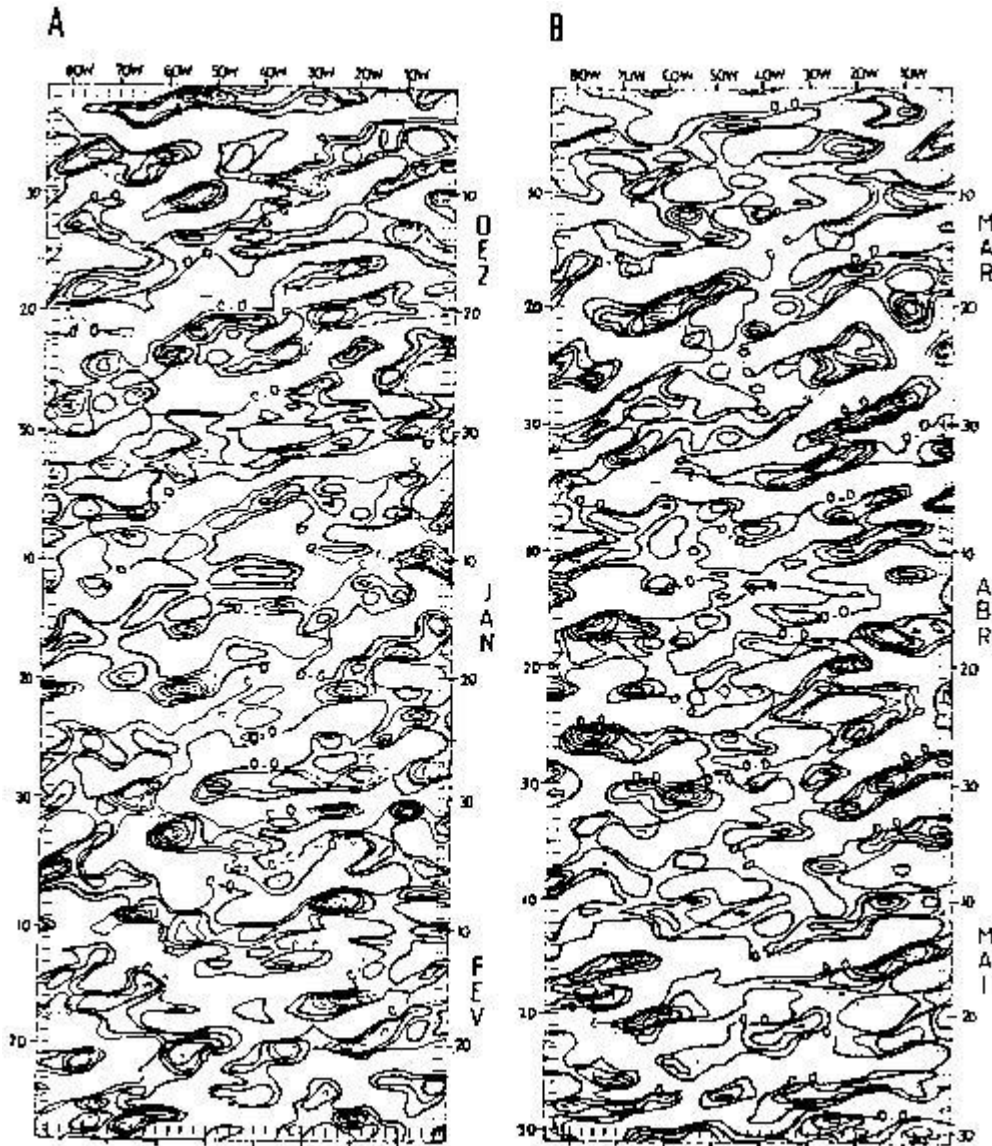


Figura 6: Diagrama de longitude versus tempo de desvios da componente meridional do vento, em relação à média do trimestre, filtrados para o intervalo de 2 a 10 dias, para DJF e MAM, do nível de 650hPa, ao longo do equador. Estão plotados somente os desvios positivos. Intervalo dos contornos: 1m/s.

### Alguns estudos realizados

#### 6.1. Segundo Yamazaki & Rao (1977)

Aplicam técnica de secções tempo-longitude de cinturões zonais para estudar as ondas de leste:

Nestes mosaicos, bandas de nebulosidade bem definidas com inclinação de leste para oeste com o tempo podem ser identificadas, podendo fornecer estimativas sobre sua velocidade de propagação (pela própria inclinação), sua frequência (pela ocorrência das linhas inclinadas) e também sobre seu comprimento de onda (compondo as informações anteriores). Assim, lugares sem cobertura amostral, como os oceanos por exemplo, podem ser estudados via imagens de satélite. Em algumas localidades e em certos períodos do ano, poucos destes distúrbios podem se transformar ou induzir a formação de violentas tempestades tropicais.

No caso do Atlântico Sul, não ocorre este tipo de situação em nenhuma época do ano e então surge a questão: existem distúrbios no Atlântico Sul similares aos das outras regiões tropicais?

Usando secções tempo-longitude para o ano de 1967, desde 20°N até 20°S em cinturões de 5° de latitude para toda a extensão longitudinal do globo foi possível detectar a existência destas linhas inclinadas no Atlântico Sul somente durante o inverno do HS (JJA).

A secção 0°-5°S pareceu apresentar menor nebulosidade sobre o Atlântico Sul; entretanto, nas secções 5°-10°S e 10°-15°S, várias linhas de nebulosidade podem ser traçadas sobre a extensão do Atlântico Sul, sobre a costa do Brasil até cerca de 040°W.

Em todas as secções, uma zona de nebulosidade permanente foi detectada por volta de 080°W, a oeste da costa oeste da AS; nesta região as águas de superfície são muito frias e tal nebulosidade permanente pode estar associada a stratus ou mesmo nevoeiro.

Sobre o Pacífico, o Índico e a costa leste da África, diversas linhas podem ser detectadas; sobre o Atlântico, a oeste de 010°E as linhas não são tão evidentes, mas podem ser detectadas.

A nebulosidade parece dissipar sobre o continente sul americano, com poucas exceções; já sobre a costa, as linhas são mais marcantes.

Uma inspeção visual do mosaico referente à tira 5°-10°S, indica que a periodicidade das perturbações sobre o Atlântico Sul é de 4-5 dias (20 linhas em 3 meses), a velocidade de propagação de cerca de 10 m/s (~040° de longitude em 4 dias) e um comprimento de onda da ordem de 4000 km.

Outros mosaicos em outros invernos também sugerem que as linhas de nebulosidade podem ser traçadas desde a costa da África até um pouco adentro da costa do Brasil; assim, é interessante notar que o inverno é a estação chuvosa no nordeste, mas esta chuva restringe-se ao litoral.

## 6.2. Segundo Ferreira, Chan e Satyamurti (1990)

Analisa as principais características e estruturas ondulatórias das ondas de leste no Atlântico Equatorial durante o FGGE, usando dados de vento do NMC (2,5° de resolução) no período DEZ78 a NOV79, para a região 22,5°N-22,5°S e 0°-085°W.

Através de diagramas de Hovmöller, que são secções temporais dos desvios da componente meridional do vento, para latitudes próximas ao equador é possível estimar visualmente as características do distúrbio ondulatório, tendo sido usado o nível de 850 hPa para construir os diagramas, uma vez que as ondas de leste adquirem maior intensidade na baixa troposfera.

Distribuição de ocorrência de distúrbios se propagando sobre o Atlântico Equatorial segundo o trimestre do ano:

- MAM com 17 eventos, SON com 16, JJA com 15 e DJF com 14.
- Em DJF as linhas estão falhas e muito desorganizadas enquanto que em MAMJJA foram observados os maiores desvios do vento meridional, sugerindo que os distúrbios estão mais ativos nesta época do ano (inverno HS).
- período médio estimado é de 5-6 dias, sendo que MAM apresentou o menor valor em relação aos demais trimestres, 5 dias.
- Em MAM, a velocidade de propagação do distúrbio apresentou seu menor valor (10 m/s) enquanto que em JJA as ondas são mais rápidas (13 m/s).
- O comprimento de onda mais curto detectado ocorreu em MAM, sendo de 4300 km; por outro lado, em JJA, quando a ZCIT está mais deslocada para o HN, as ondas estão mais longas (6900 km) e se propagam mais rapidamente.

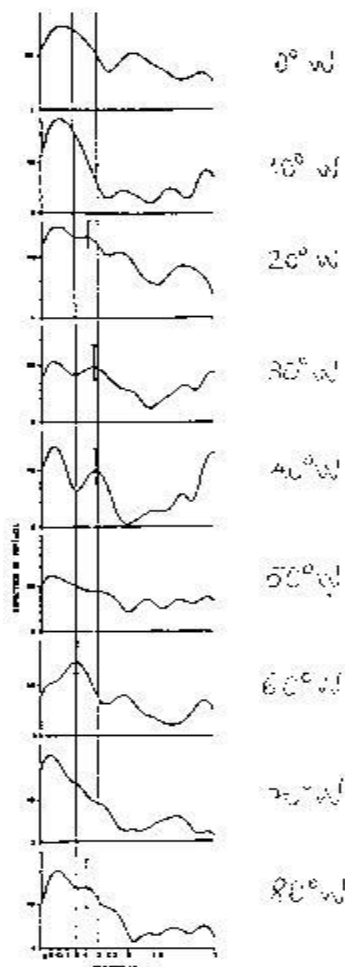
Além das estimativas visuais, espectros de potência suavizados da componente meridional do vento foram avaliados para cada faixa de longitude, visando identificar quais bandas de frequências dos distúrbios estão presentes na área como um todo (cabe dizer que os períodos estimados espectralmente são menores do que os estimados visualmente pelos diagramas).

Figura - Estimativas do espectro de potência suavizado de desvios da componente meridional do vento em relação à média de cada trimestre no nível de 850 hPa e latitude de 5°S de MAM. O eixo das ordenadas está em escala logarítmica.

Para 5°S, as características dos espectros para as bandas de longitude em MAM são:

- Boa parte da energia dos distúrbios está contida em períodos maiores do que 3 dias; observa-se também que existem picos na faixa de 10 dias, referentes aos distúrbios de baixa frequência.
- Em 050°W, o espectro parece ruído branco, ou seja, não existem picos significativos (pode ser constatada na secção temporal a desorganização dos distúrbios nesta longitude).

O pico entre 3 e 5 dias se define melhor entre 020° e 040°W, enquanto que em 060°W, o pico tende para 5 dias.

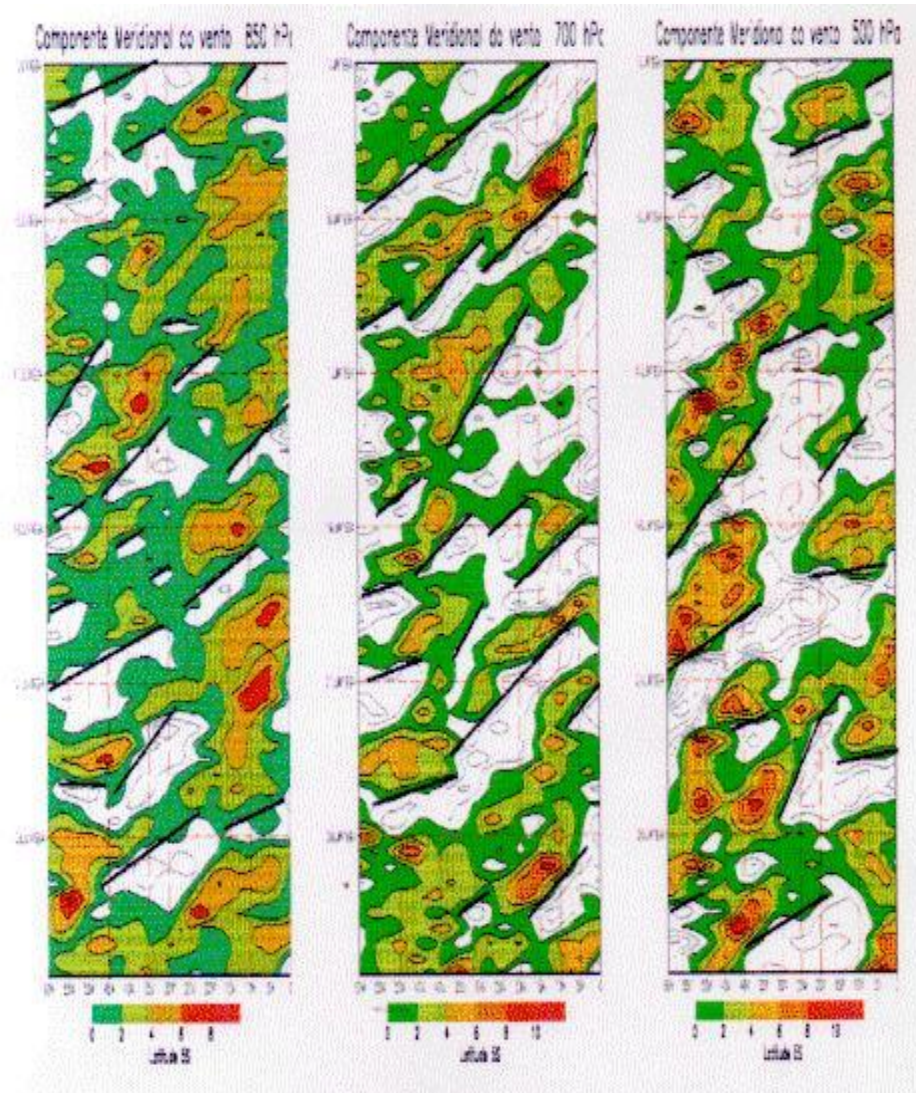


*Figura 7*

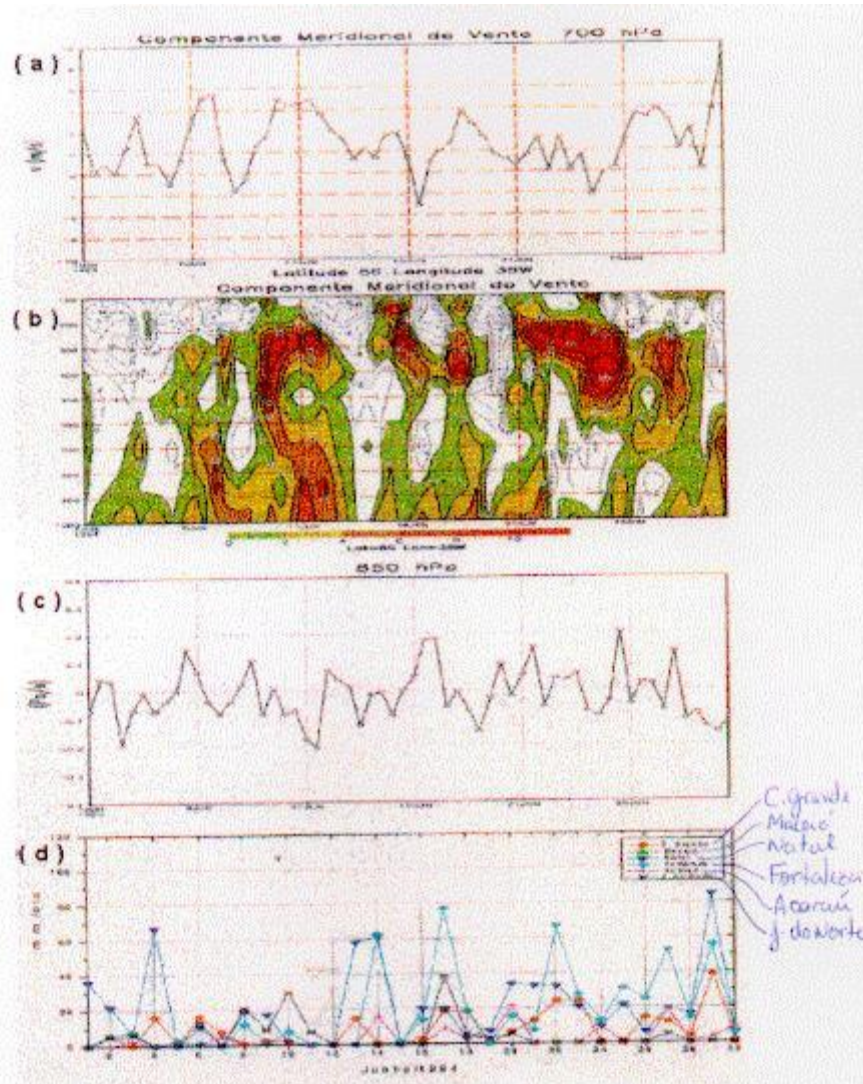


### 6.3. Estudo de Caso: Caio Coelho, 1998

A partir das análises do NMC, foram construídos diagramas Hovmöller, que são seções 2-D do tempo versus longitude, no caso da componente meridional do vento de determinado nível e latitude (figura 6), sendo então possível identificar as ondas separadamente e sua propagação com o tempo. Os diagramas são determinados nas latitudes de 0°, 5°S e 10°S nos níveis de 850, 700 e 500hPa, para o período de junho à agosto de 1994. Os eixos dos cavados e das cristas das ondas são identificados pelas isolinhas de zero da componente meridional do vento. Parâmetros básicos das ondas são estimados visualmente nestes diagramas, no qual a velocidade de propagação ( $c$ ), medida em graus de longitude por tempo, é obtida pela inclinação das isolinhas; período médio das ondas ( $\tau$ ) é obtido o quociente entre o intervalo de tempo decorrido da passagem consecutiva das ondas na longitude de 35°W pelo número de distúrbios. O comprimento da onda ( $L$ ) foi determinado através da relação  $L = c \tau$ .



*Figura 8:* Diagramas de Hovmöller da componente meridional do vento (m/s), na longitude de 5°S, nos níveis de (a) 850, (b) 700 e (c) 500 do mês de junho de 1994. As regiões hachuradas representam os valores positivos e as linhas destacadas, que unem as isolinhas de zero, indicam o deslocamento das ondas.



*Figura 9:* Secções temporais do mês de junho de 1994, na latitude de 5°S e longitude de 35°W, da componente meridional do vento (a) no nível de 700hPa; (b) perfil vertical da componente meridional do vento entre 1000 e 100hPa; (c) do movimento vertical em 850hPa, e (d) das precipitações registradas em algumas localidades da região nordeste.



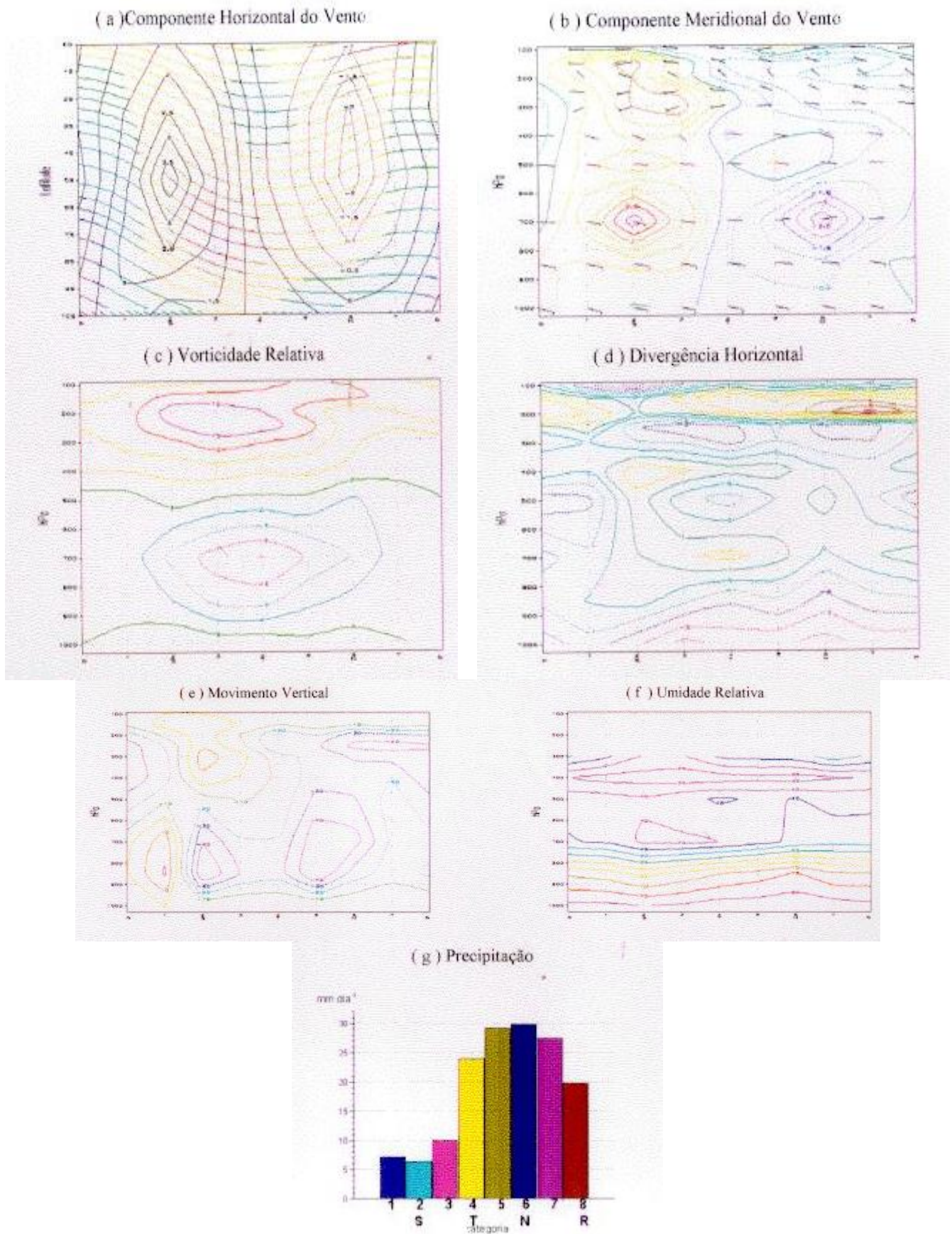


Figura 10: Onda composta: variação latitudinal dos campos de linhas de corrente em 700hPa, juntamente com as isotacas da componente meridional do vento (m/s)

associados com a categoria da onda composta em 5S. Perfis verticais: (a) da componente horizontal do vento, (b) da componente meridional do vento, (c) da vorticidade relativa ( $10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ), (d) da divergência horizontal ( $10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ), (e) do movimento vertical ( $10^{-5} \text{ hPa s}^{-1}$ ) em coordenadas isobáricas, (f) da umidade relativa (%), e (g) taxa de precipitação (mm/dia) em Natal (RN), em função das categorias da onda composta. As categorias 2, 4, 6 e 8 são respectivamente, as regiões dos ventos de sul (S), do cavado (T), dos ventos de norte (N) e da crista (R). As regiões intermediárias são as categorias 1, 3, 5 e 7.

### **Conclusões:**

Os 13 distúrbios de leste que se deslocaram na latitude de  $5^{\circ}\text{S}$  e que cruzaram a longitude de  $35^{\circ}\text{W}$ , durante o período de 03/06/1994 - 27/07/1994, apresentaram:

- A divergência horizontal apresentou uma estrutura complexa de camadas alternadas de convergência e divergência com as passagens das fases da onda composta.
- A máxima convergência nos baixos níveis parece estar associada com um máximo principal de movimento vertical ascendente, com o máximo da componente norte do vento que atinge numa direção quase perpendicular a linha de costa nas proximidades do ponto de referência (Natal).
- A distribuição de umidade relativa relacionada com a onda composta apresentou as regiões mais úmidas após a passagem do cavado na categoria relativa aos ventos de norte, junto com o máximo de precipitação.
- As regiões mais secas encontravam-se após a passagem da crista relacionadas com os ventos de sul.

## **Questionário**

- 1) O que são Ondas de Leste?
- 2) Como podemos avaliar as ondas de leste e quais os cuidados necessários em sua detecção?
- 3) Discuta as regiões de intensificação e desintensificação das Ondas de Leste pelo globo.
- 4) Qual o comprimento de onda, o período e a velocidade característica das Ondas de Leste para cada região?
- 5) Qual a relação da inclinação do cavado com relação a vertical para as Ondas de Leste?
- 6) Discuta a relação de liberação de calor latente no desenvolvimento das Ondas de Leste?
- 7) Quais as fontes de energia para as Ondas de Leste? Resuma com suas próprias palavras cada uma delas.

## **Referências**

YAMAZAKI, Y. & RAO, V.B. 1977: Tropical cloudiness over the South Atlantic Ocean, *J. Met. Soc. Jap.*, 55(2), 205-207.

FERREIRA, N.J., CHAN, C.S. & SATYAMURTI, P. 1990: Análise dos distúrbios ondulatórios de leste sobre o oceano Atlântico Equatorial Sul, XI Congr. Bras. Meteorologia, Rio de Janeiro, 462-466.

ASNANI, C.G. 1992: Tropical Meteorology, Chapter 8, Easterly Waves, Indian Institute of Tropical Meteorology.