

Universidade de São Paulo – USP  
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – IAG  
Departamento de Ciências Atmosféricas – ACA  
Meteorologia Sinótica

## **Frentes e frontogêneses**

### **Frentes**

- **Frente** é uma zona de transição entre duas massas de diferentes densidades e temperaturas, causando uma grande mudança nas variáveis meteorológicas;
- Estão associadas às ondas baroclínicas de latitudes médias (o cisalhamento vertical do vento está diretamente ligado a gradientes horizontais de temperatura).
- Agem no sentido de diminuir o gradiente horizontal de temperatura (levando o ar polar para a região tropical e ar tropical para a região polar).
- Causam variações na distribuição de precipitação e temperatura em quase todo o Brasil.
- Visto que a frente é uma zona de transição entre duas massas de ar, deve existir um limite entre elas, chamada superfície ou *zona frontal*;
- **Zona frontal**: quando duas massas de ar de diferentes regiões de origem e, portanto com diferentes características, aproximam-se, formam uma zona de transição chamada zona frontal, caracterizada pelos elevados gradientes horizontais de temperatura e umidade

(Kousky e Elias, 1982). Em alguns casos esta zona é bastante abrupta (devido ao intenso gradiente de densidade), enquanto em outros ela pode ser bastante gradual;

- Superfície ou *zona frontal* pode ser caracterizada por uma ou mais propriedades descritas abaixo:
  - Zona de fortes gradientes de temperatura, umidade, vorticidade e movimento vertical na direção perpendicular à frente;
  - Gradientes descontínuos da escala sinótica;
  - Um mínimo relativo de pressão, isto é, uma "baixa";
  - Um máximo relativo de vorticidade ao longo da frente;
  - Uma zona de confluência ao longo da frente;
  - Forte cisalhamento vertical e horizontal ao longo da frente;
  - Mudanças rápidas das propriedades das nuvens e da precipitação.
- Importante: Estas propriedades não, necessariamente, coincidem espacialmente ou movem com a mesma velocidade.

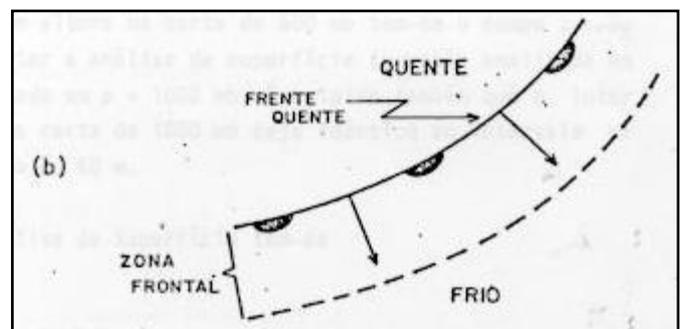
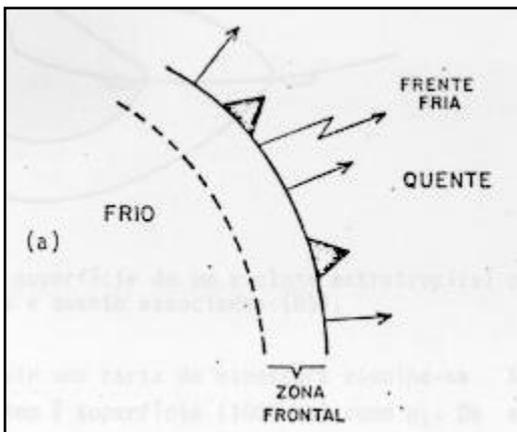




Figura 1: Esquema que ilustra (a) frente fria, (b) frente quente e (c) frente estacionária, todas para o HS.

- Os seguintes critérios são usados para localizar uma frente em uma carta de superfície:
  - Forte mudança de temperatura em uma distância relativamente curta;
  - Variações no conteúdo de umidade;
  - Variações na direção do vento;
  - Presença de nuvens e precipitação;
  
- As frentes podem ser classificadas pelo movimento relativo das massas de ar quente e fria envolvidas:
  - ✓ Frente Fria: Quando uma massa de ar frio avança sob uma massa de ar quente, é chamada de frente fria. A frente tem forte estabilidade estática e cisalhamento vertical. Abaixo da frente, no ar frio, o lapserate pode ser aproximado pela adiabática seca e pode haver mistura vertical turbulenta.
  - ✓ Frente Quente: Quando o ar quente avança sobre o ar frio, é chamada frente quente. O movimento da frente quente está associado com forte advecção quente em baixos níveis do lado leste da superfície ciclônica, mas não é verdade que todo ciclone tem frente quente.

- ✓ Frente Estacionária: Quando não há o avanço do ar frio nem o avanço do ar quente relativamente uma ao outro, gera-se entre eles uma frente estacionária. A precipitação associada é geralmente leve e estratiforme, mas pode tornar-se bem significativa se a frente permanecer estacionária por muito tempo.
- ✓ Frente Oclusa: Quando uma frente fria (o setor frio, que move-se mais rápido) alcança/ultrapassa uma frente quente do lado leste ou equatorial do ciclone (e o ar quente é forçado a subir), o resultado é chamado de oclusão. A camada limite onde a frente fria encontra a frente quente é chamada de frente oclusa.

Em outras palavras:

**Frente fria (quente): linha de confluência** que define o **limite** entre uma **massa de ar quente** homogênea e a **zona frontal**. **Borda anterior (posterior) da zona frontal**, quando o **ar frio (quente) avança e substitui** o ar mais **quente (frio)** (Wallace e Hobbs, 1977).

Quando ocorre o encontro de duas massas de ar, elas não se misturam imediatamente. A massa mais fria (mais densa) é sobreposta pela massa mais quente (menos densa), formando uma zona de transição, denominada de frente.

Se a massa fria avança em direção à massa quente, a frente é denominada FRIA

Se a massa quente avança em direção à massa fria, a frente é denominada QUENTE

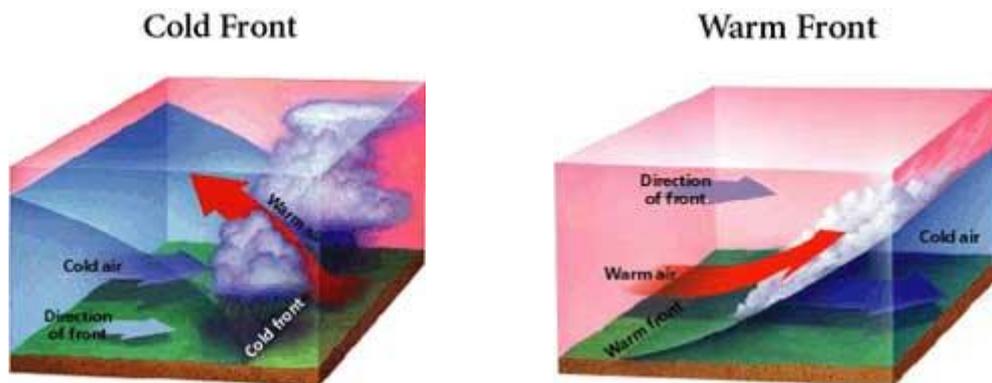


Figura 2

- Um sistema frontal clássico é geralmente composto por uma frente fria, frente quente e centro de baixa pressão na superfície chamado ciclone, como esquematizado na *Figura 3*.

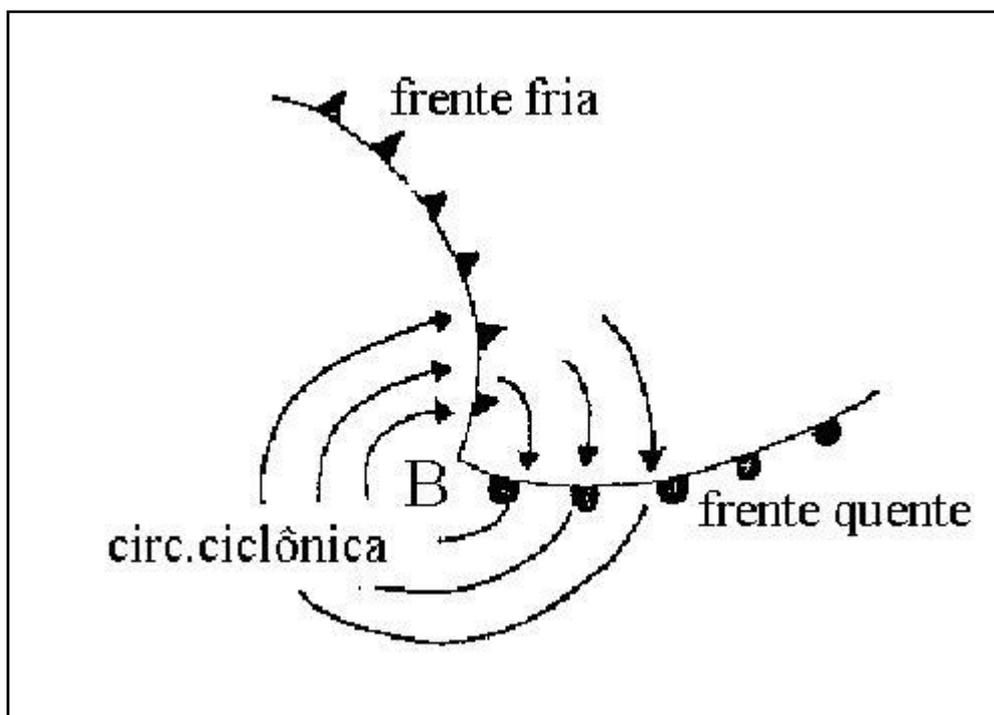


Figura 3: Esquematização de um sistema frontal clássico.

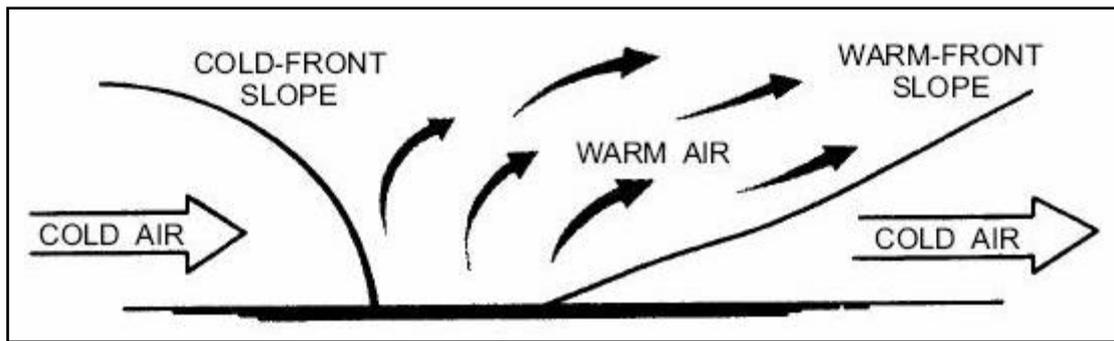


Figura 4

- Os esforços pioneiros para elaborar um esquema para o desenvolvimento de um sistema frontal foram feitos por Bjerknes e seu grupo, na Noruega, por volta de 1920;

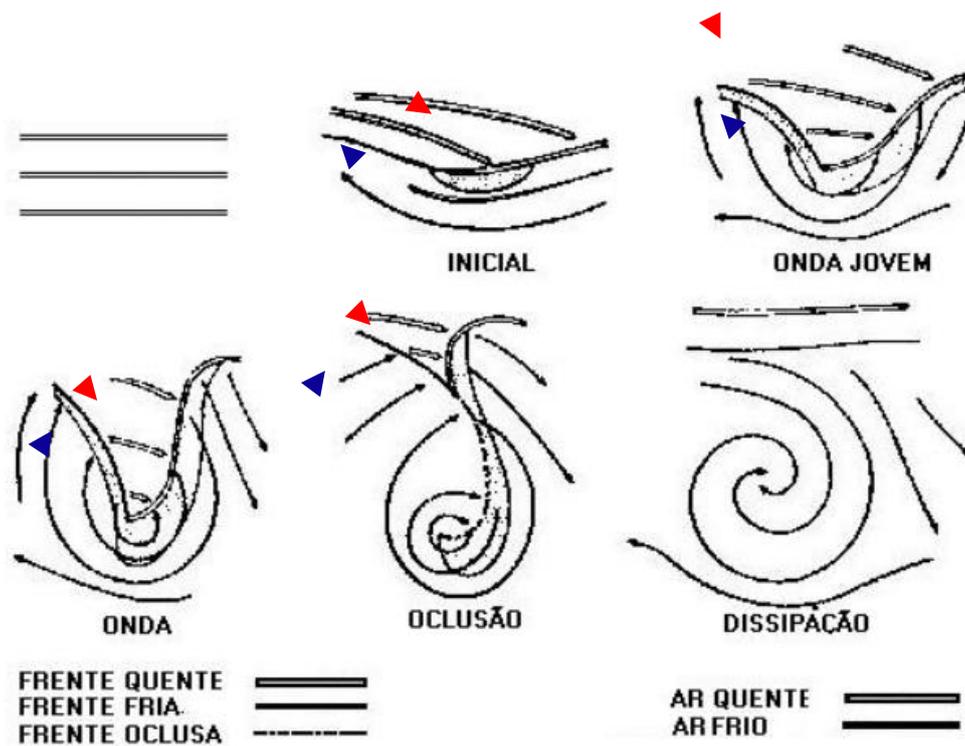


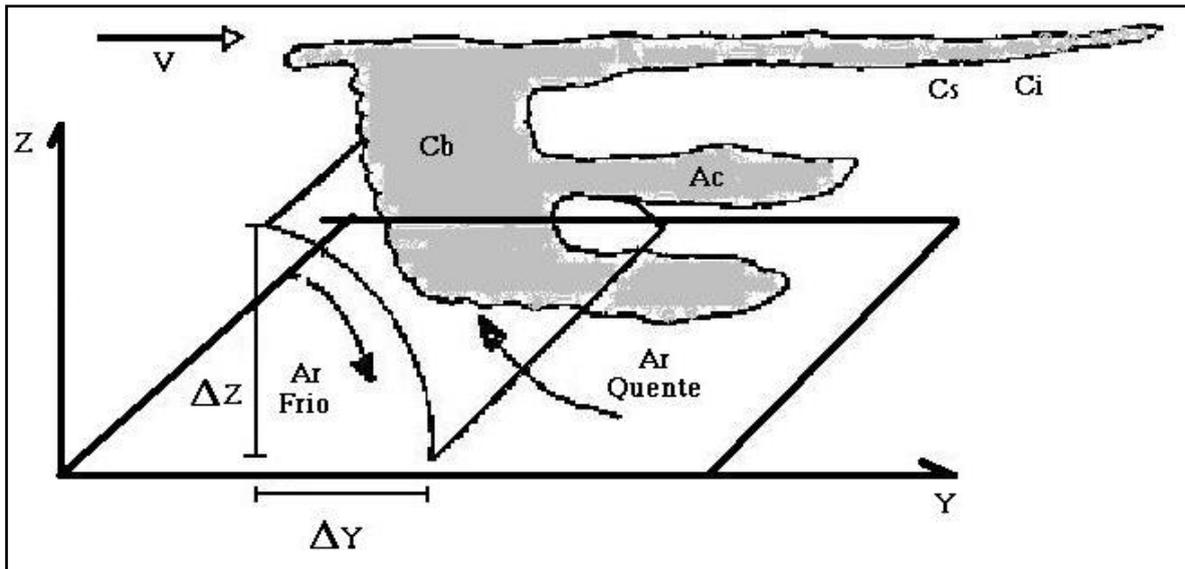
Figura 5

- Uma pequena onda tende a separar ar quente de ar frio, sendo que o ar frio força o ar quente a se elevar;

- Esta elevação causa convergência nos baixos níveis e, portanto, ocorre geração de circulação ciclônica;
- E assim por diante...
- As forçantes orográficas, térmicas e os distúrbios transientes formam oscilações no escoamento atmosférico. Algumas delas possuem comprimentos de onda de escala sinótica, as quais acompanham os sistemas frontais e estão associados a grandes gradientes meridionais de temperatura;
- Obviamente existe a influência do escoamento de altos níveis no desenvolvimento de superfície.

→ **Características gerais de um sistema frontal:**

- Na superfície frontal, o ar frio e denso ao descer força o ar quente a subir e se condensar em uma série de nuvens cumuliformes;
- O vento de altos níveis desprende cristais de gelo do topo dos Cbs formando uma faixa de cirrus;
- Na região da superfície frontal, Cbs produzem forte precipitação com rajadas de vento (é por isso que sentimos um ar gelado antes da tempestade!);
- Após a passagem do sistema o vento muda de direção, a pressão sobe, o ar fica mais frio e a precipitação cessa.
- A inclinação da superfície frontal está relacionada com a velocidade da frente; para frentes rápidas (12 m/s), a inclinação é de 1 para 50; para frentes lentas (7 m/s), a inclinação é de 1 para 100.



*Figura 5*

- Uma análise das ocorrências de sistemas frontais em estações de superfície no Brasil, separando-as em uma linha de estações costeiras, uma linha mais interna e uma terceira linha, ainda mais interna, é feita mensalmente pelo CLIMANÁLISE;
  - É possível notar os diferentes comportamentos conforme a época do ano, tais como velocidade de propagação, localidades atingidas e frequência mensal de ocorrência (ex: Janeiro, Abril, Julho e Outubro 1995);
- Em termos climatológicos, é possível citar um trabalho que considera 3 bandas latitudinais e faz uma estatística do número mensal de ocorrências em cada banda; além disso, uma comparação entre dois períodos, 1975 a 1984 e 1987 a 1995, indica um aumento significativo do número de sistemas frontais nas faixas latitudinais mais ao sul do país (ex: fig. 2, 3, 4 e 5 pág. 134 135 do Climanálise Especial 1996).
  - A banda **(B)** 35°S/25°S está entre as cidades de Santa Vitória do Palmar-RS e Iguape-SP, a banda **(C)** de 25°S/20°S de Iguape-SP

até Vitória-ES e a região acima de 20°S desde Vitória-ES até Ceará Mirim-RN correspondente a banda (D).

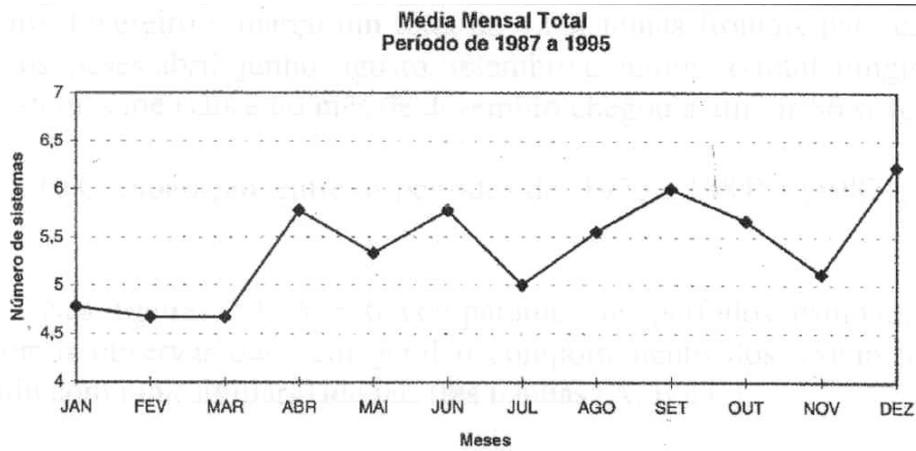


Figura 6: Média mensal dos sistemas que atuam no litoral do Brasil. Fonte: Climanálise Especial, 1996.

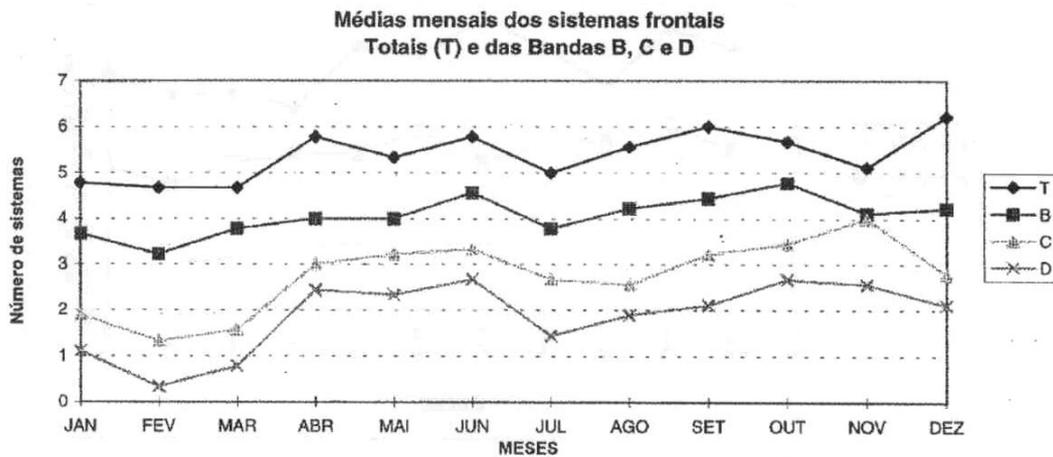
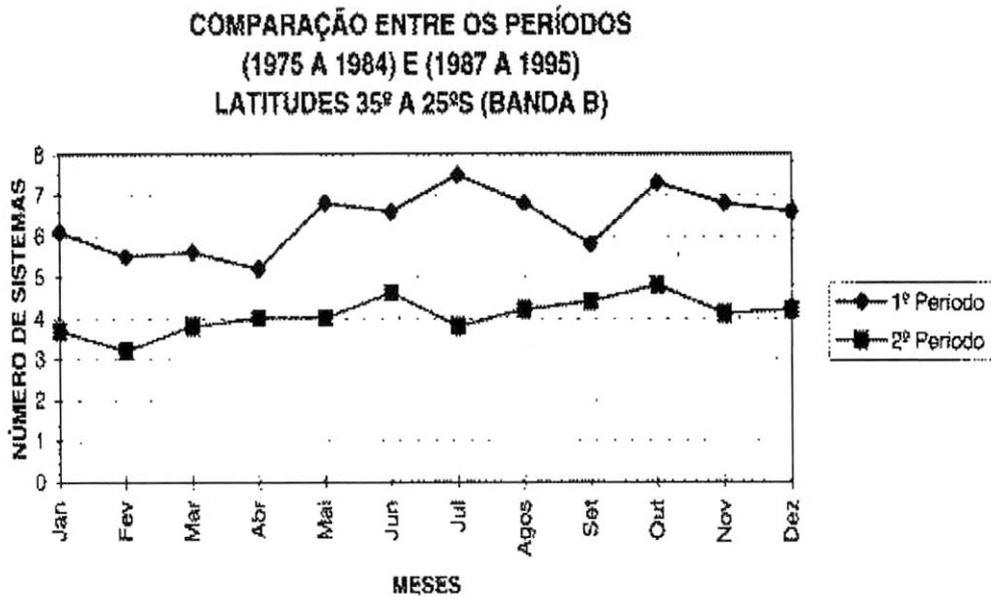
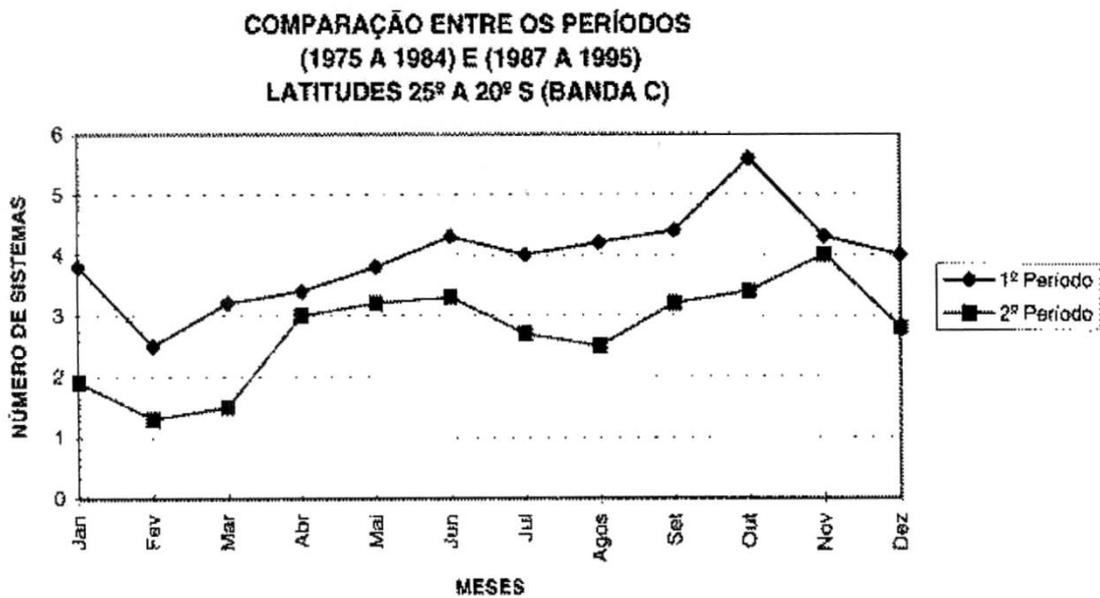


Figura 7: Média mensal total dos sistemas frontais nas bandas B, C e D. Fonte: Climanálise Especial, 1996.



*Figura 8:* Comparação do número de sistemas entre os dois períodos na banda A.



*Figura 9:* Comparação do número de sistemas entre os dois períodos na banda C.

Dias		-2	-1	0	1	2
Variáveis						
V e r ã o	v	↓	↓	↑	↑	↑
	u	→	→	←	←	←
	vh	↘	↘	↙	↙	↙
	T (°C)	22,7	23,2	21,6	20,7	21,2
	UR (%)	76,3	77,4	83,4	83,0	81,1
	P (mbar)	922,8	922,3	923,4	924,5	924,2
	PPT (mm/dia)	5,8	9,6	8,9	3,8	5,6
	Precipitação total			6034mm (41%)		
Intervalo entre frentes			5 dias			
I n v e r n o	v	↓	↓	↑	↑	↑
	u	→	←	←	←	←
	vh	↘	↙	↙	↙	↙
	T (°C)	17,4	18,2	15,4	13,8	14,6
	UR (%)	75,6	72,7	84,5	87,4	83,6
	P (mbar)	927,8	927,0	928,8	930,7	930,7
	PPT (mm/dia)	1,8	2,4	2,9	2,0	1,2
	Precipitação total			1889mm (59%)		

Figura 10: Síntese das variáveis meteorológicas na passagem de frentes frias na cidade de São Paulo (1981-2002). Fonte: Dametto e Rocha, 2006.

- No inverno, o vento dois dias antes da passagem é de noroeste o que implica em um ar quente e seco, como mostra a UR maior para o dia -2 em relação ao dia seguinte;
- Para o inverno e verão o vento médio no dia da passagem e nos dois que seguem são de sudeste, trazendo para São Paulo ar frio;
- Diferentemente do inverno no qual a UR diminui um dia antes da passagem da frente fria, para o verão há um pequeno aumento;
- A temperatura sofre um aumento um dia antes da passagem e uma diminuição um dia depois;
- A pressão diminui um dia antes da passagem e sobe nos dois dias que seguem.

- Mudanças importantes nas condições de tempo são observadas durante a passagem de uma frente fria, tais como: mudança da direção do vento, presença de nuvens e precipitação, variações no conteúdo de umidade, decréscimo da temperatura, aumento da pressão atmosférica, forte cisalhamento vertical e horizontal (Petterssen, 1956);
- Após a passagem de uma frente fria, normalmente, observa-se queda de temperatura acentuada, aumento de pressão, rajadas de vento, quando o gradiente de pressão é intenso, e a precipitação cessa;
- Nas Regiões Sul e Sudeste do Brasil os ventos em baixos níveis têm direção de nordeste influenciados pela presença da alta subtropical que fica climatologicamente situada sobre o Oceano Atlântico. Numa situação pré-frontal o vento gira tipicamente para noroeste e depois para sudoeste e sudeste na medida em que a frente passa;
- As frentes frias que atingem o Sudeste do Brasil são orientadas na direção noroeste-sudeste com deslocamento típico de sudoeste para nordeste;
- Algumas frentes atingem latitudes mais baixas, chegando na região amazônica inclusive, provocando o fenômeno conhecido como friagem descrita em Marengo *et al.* (1997).

## **Frontogêneses**

- Quando o contraste de temperatura aumenta, existe desenvolvimento e/ou intensificação do sistema (frontogênese); se o gradiente de temperatura diminui, existe a dissipação (frontólise);
- Em outras palavras:
- ✓ **Frontogênese** é o processo de formação ou intensificação de uma frente;
- ✓ **Frontólise** é o processo de destruição ou enfraquecimento de uma frente;
- Certas regiões do globo exibem grande frequência de frontogênese (zonas frontogenéticas). Estas regiões coincidem com regiões de grande contraste térmico. As duas regiões mais importantes são sobre os oceanos Pacífico Norte e Atlântico Norte;

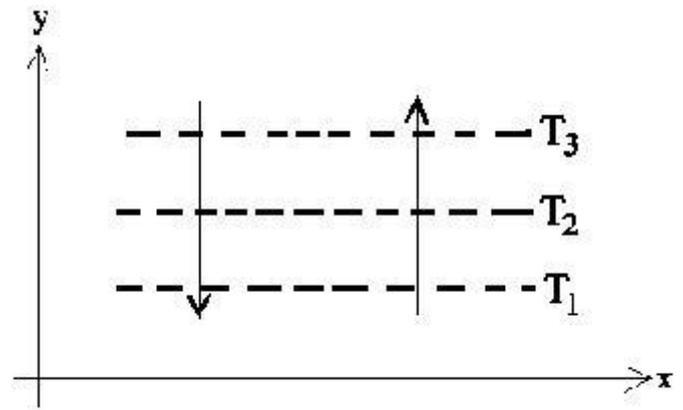
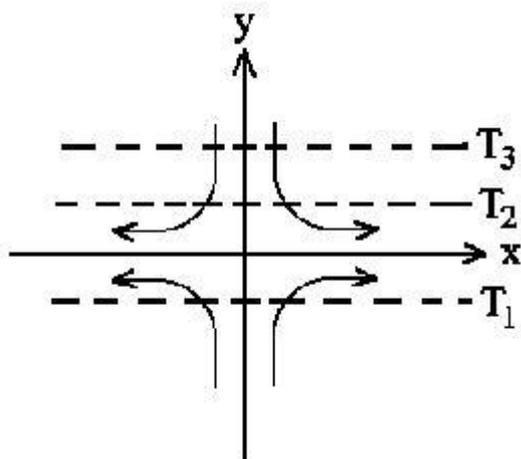
### → **Mecanismos que favorecem a frontogênese:**

1. Campo de deformação horizontal (Figura 11a);
2. Campo de Cisalhamento Horizontal (Figura 11b);
3. Campo de Dilatação Vertical (Figura 11c);
4. Movimentos Verticais Diferenciados (Figura 11d).

### → **Mecanismos que favorecem a frontólise:**

1. Liberação de Calor Latente;
2. Atrito com a Superfície;
3. Turbulência e Mistura;
4. Radiação;
5. Movimentos Verticais Diferenciados (Figura 11d).

- Obs1: Os itens 1 a 4 dos mecanismos que favorecem a frontólise, em geral, desfavorecem a frontogênese;
- Obs2: Os mecanismos de cisalhamento e campo de deformações horizontais funcionam no sentido de concentrar os gradientes térmicos em escalas sinóticas (~1000 km); por outro lado, frontogêneses rápidas podem apresentar zonas frontais de até 50 km em escalas de tempo de 1 a 2 horas, as quais não podem ser geradas isoladamente por estes mecanismos; esta brusca redução é basicamente causada pela circulação secundária induzida pelo escoamento quase geostrófico em escala sinótica e também por processos úmidos;
- Nota-se que movimentos Verticais Diferenciados podem ser Frontogénéticos ou Frontolíticos;



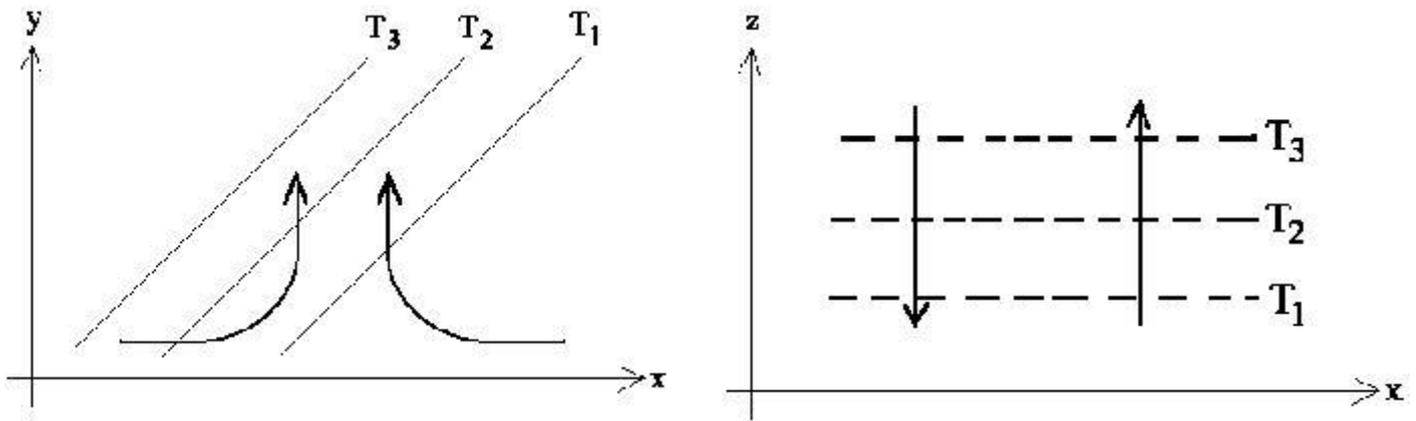
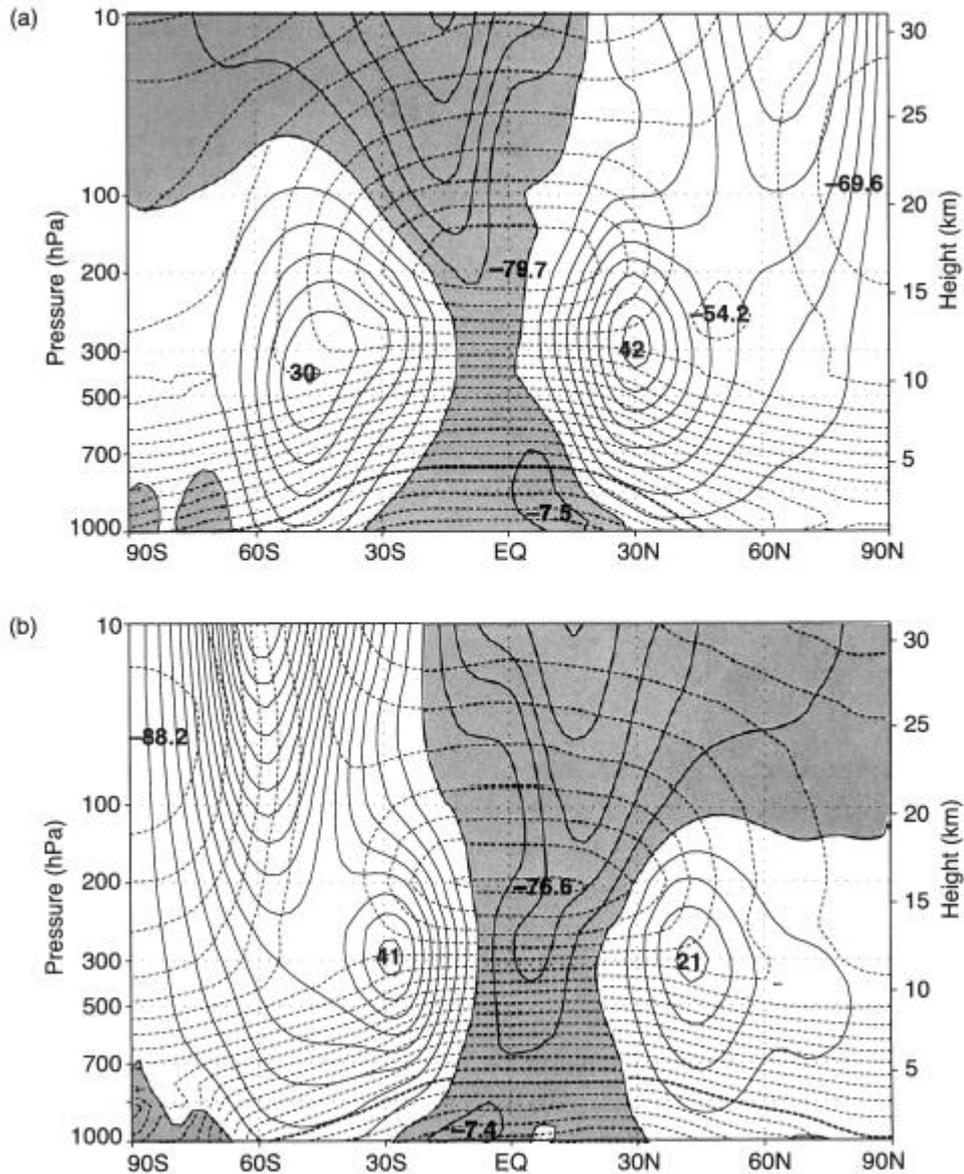


Figura 11

- ✚ Sobre a circulação secundária, temos os seguintes comentários:
  - Na superfície, aumenta o gradiente de temperatura no lado quente do jato, enquanto que nos níveis altos, o gradiente intensificado é no lado frio: a zona frontal se inclina para o lado frio do eixo do jato;
  - Na vertical, tende a aquecer adiabaticamente no lado frio e esfriar adiabaticamente o lado quente: por isso, as frentes são mais intensas na superfície e nos altos níveis, em comparação aos níveis médios;
  - Com a concentração de isothermas no lado frio do eixo do jato em altos níveis, existe aceleração na direção transversal ao jato, que por Coriolis tende a intensificar o próprio jato: com a aceleração do jato, existe geração de vorticidade anticiclônica no lado quente do eixo do jato e ciclônica, no lado frio, o que corresponde a difluência no lado quente e confluência no lado frio, nos altos níveis.
- Na Figura 12 são mostradas secções meridionais de campos de temperatura e vento zonal, ambos promediados quanto à longitude, para inverno e verão:



Meridional cross sections of longitudinally and time-averaged zonal wind (solid contours, interval of  $\text{m s}^{-1}$ ) and temperature (dashed contours, interval of 5 K) for December-February (a) and June-August (b). Easterly winds are shaded and  $0^\circ\text{C}$  isotherm is darkened. Wind maxima shown in  $\text{m s}^{-1}$ , temperature minima shown in  $^\circ\text{C}$ . (Based on NCEP/NCAR reanalyses; after Wallace, 2003.)

Figura 12: Fonte: An Introduction to Dynamic Meteorology – Holton.

- Observa-se a existência de núcleos de máxima intensidade do jato em altos níveis (200hPa) diretamente associadas a regiões de máximo contraste térmico.

- Diferenças mais marcantes no HN do que no HS (devido basicamente à proporção continente-oceano em ambos hemisférios) quanto a intensidades desse jato; sua posição é a mesma em ambos hemisférios, sendo  $30-35^\circ$  durante o inverno e  $40-45^\circ$  durante o verão.

Examinando as variabilidades longitudinais, para verão no HS:

- Evidentemente, algumas áreas possuem desvios maiores do que as secções anteriores (promediados na longitude);
  - A localização dos jatos máximos indica regiões preferenciais para o desenvolvimento de distúrbios meteorológicos em escala sinótica. Os gradientes horizontais de temperatura tendem a se concentrar nessas regiões associadas aos jatos de altos níveis, chamadas zonas baroclínicas;
  - Em uma média temporal, as ondas baroclínicas ali geradas tendem a enfraquecer o gradiente horizontal de temperatura, promovendo mistura das massas de ar; mas, de qualquer forma, o contraste médio é mantido pelo aquecimento solar diferenciado. Por outro lado, existem processos dinâmicos transientes associados à baroclinicidade que produzem zonas com gradientes de temperatura bastante intensos. Essas zonas, particularmente intensas na superfície são as zonas frontais ou frentes; o processo que as origina é chamado de FRONTOGÊNESE.
- Assim, mesmo que os distúrbios baroclínicos em média enfraqueçam os gradientes de temperatura, escoamentos locais associados à baroclinicidade podem aumentar os contrastes térmicos.

## Trabalhos feitos sobre Frentes e Frontogêneses

### Satyamurty & Mattos (1989):

- Avaliam os campos de deformação horizontais D1 e D2:

$$D_1 = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \quad D_2 = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}$$

- Calculam a função frontogenética segundo os campos D1 e D2:

$$F = -\frac{1}{2} |\nabla T| (D \cos 2\gamma + \delta)$$

Onde:

$$|\nabla T| = \left[ \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2}$$
$$D = (D_1^2 + D_2^2)^{1/2}$$

Ângulo entre o eixo de dilatação e o gradiente de T:

$$\gamma = \alpha - \beta$$

$$\tan(2\alpha) = \left( \frac{D_1}{D_2} \right) \tan \beta = \left[ \frac{\partial T / \partial y}{\partial T / \partial x} \right]$$

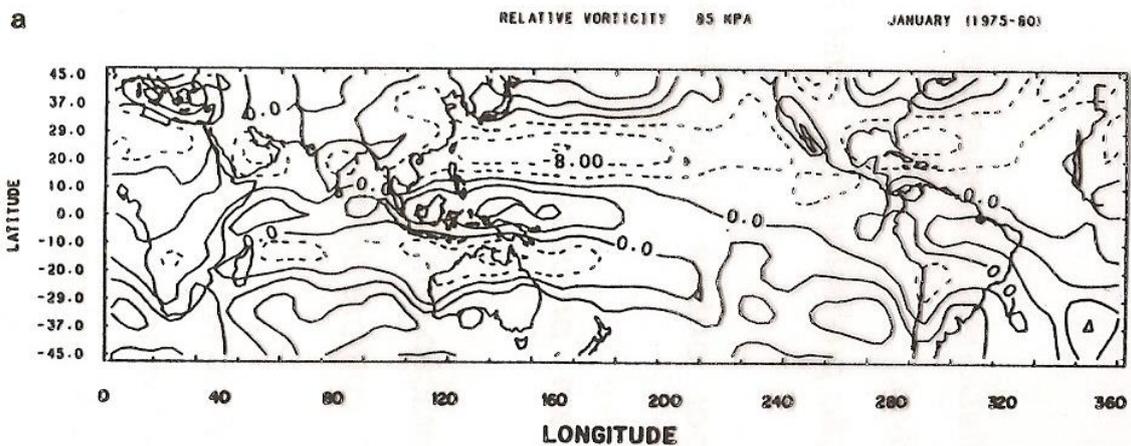
Divergência horizontal:

$$\delta = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}$$

- Fazem um estudo climatológico de regiões preferenciais para ocorrência de frontogênese, com base em 7 anos de dados na faixa 45°N e 45°S.
- Utilizam diferenças centradas no espaço para os cálculos de D1 e D2.
- Apresentam resultados para 4 meses mais representativos (Jan, Abr, Jul e Out) e também para a média anual.

Obs: foram usadas temperaturas do bulbo seco; porém, o uso de temperatura virtual é mais adequado para levar em conta efeitos da umidade na distribuição de densidade.

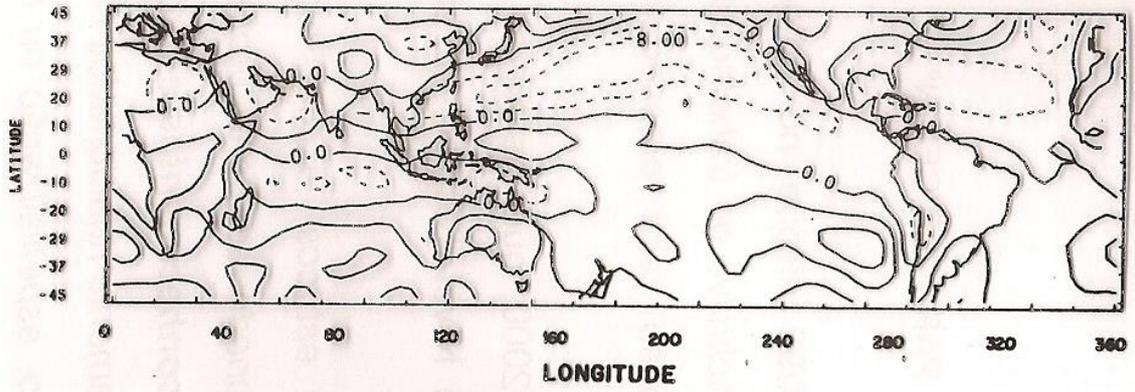
➤ Campos climatológicos de vorticidade relativa em 850 hPa (fig 13):



b

RELATIVE VORTICITY 85 KPA

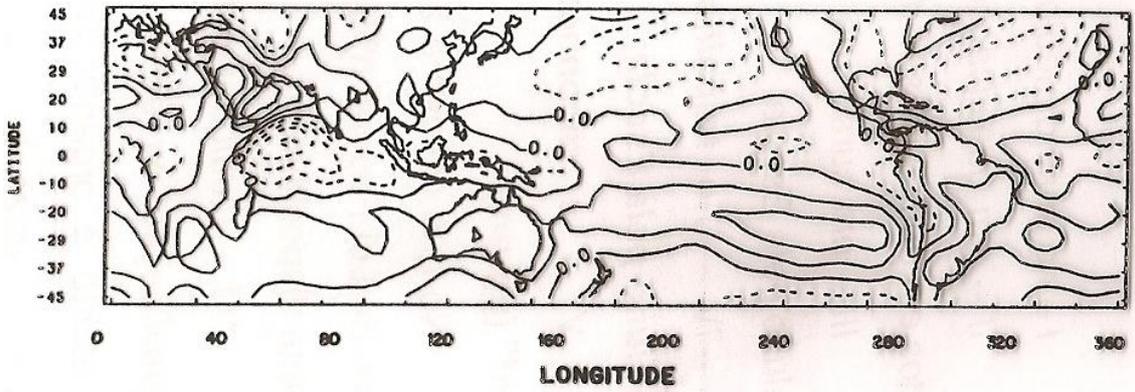
APRIL (1975-80)



c

RELATIVE VORTICITY 85 KPA

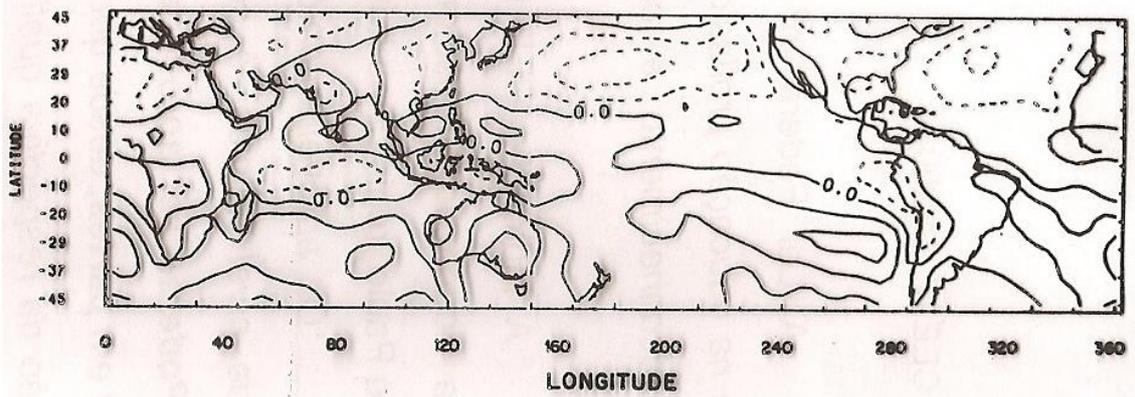
JULY (1975-80)



d

RELATIVE VORTICITY 85 KPA

OCTOBER (1975-80)



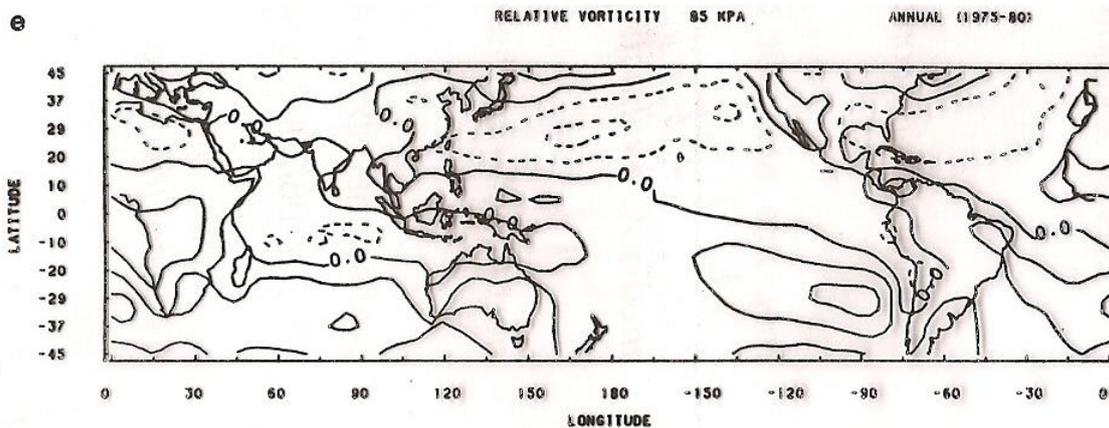


FIG. 2. Climatological relative vorticity fields at 85 kPa for the four months, (a) January; (b) April; (c) July and (d) October and for (e) the year as a whole. Positive isolines are continuous and negative isolines are broken, drawn at intervals of  $4 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ .

Figura 13: Tracejadas no HS e contínuas no HN representam vorticidade ciclônica. Observe campo ciclônico na costa oeste da América do Sul.

- Campo climatológico de deformação em 850 hPa (Figura 14. Note deformação na região correspondente ao campo ciclônico citado):

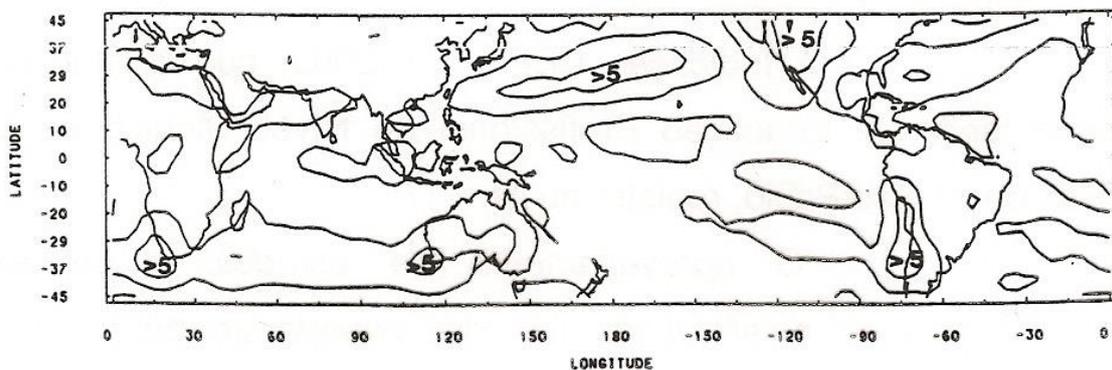
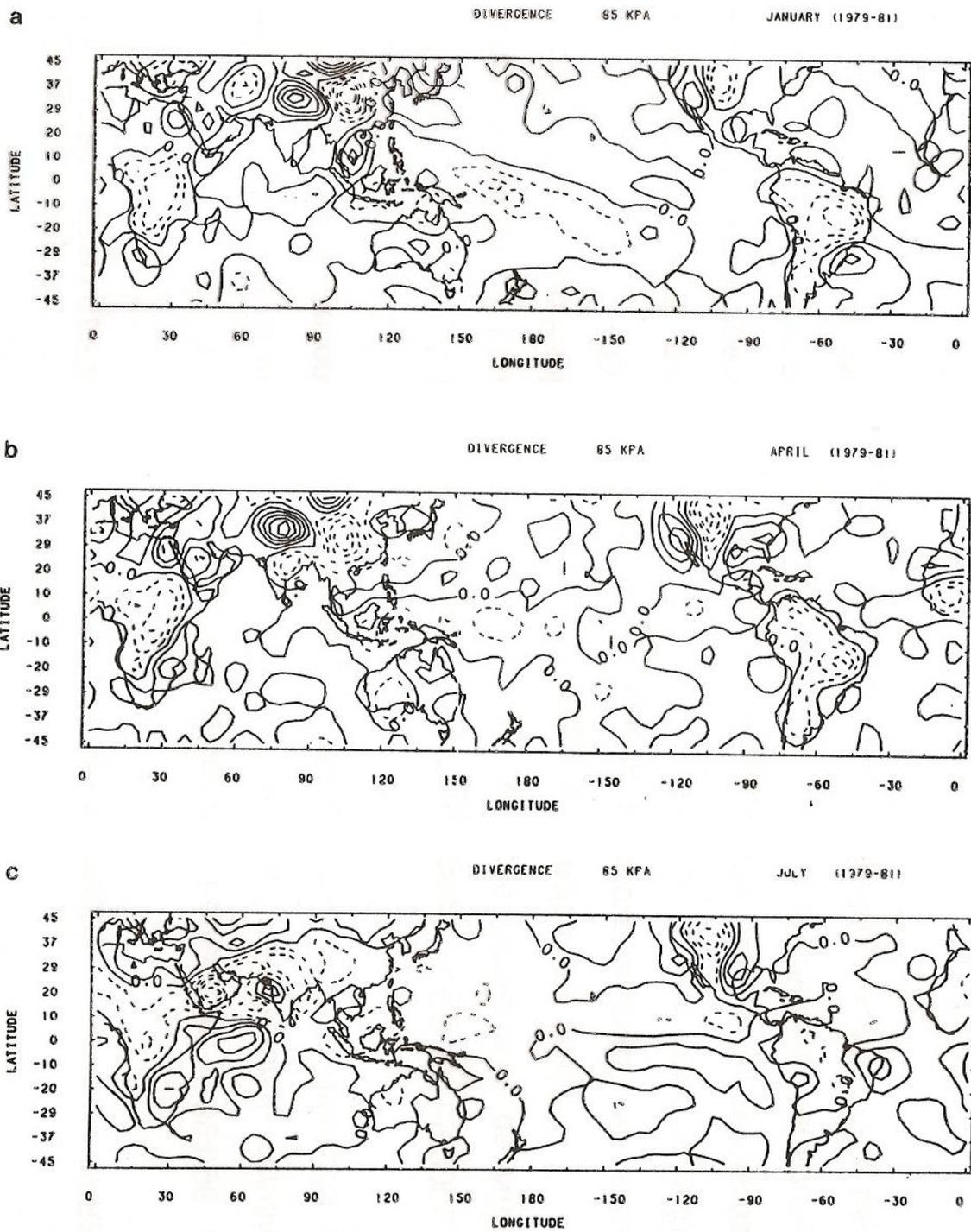
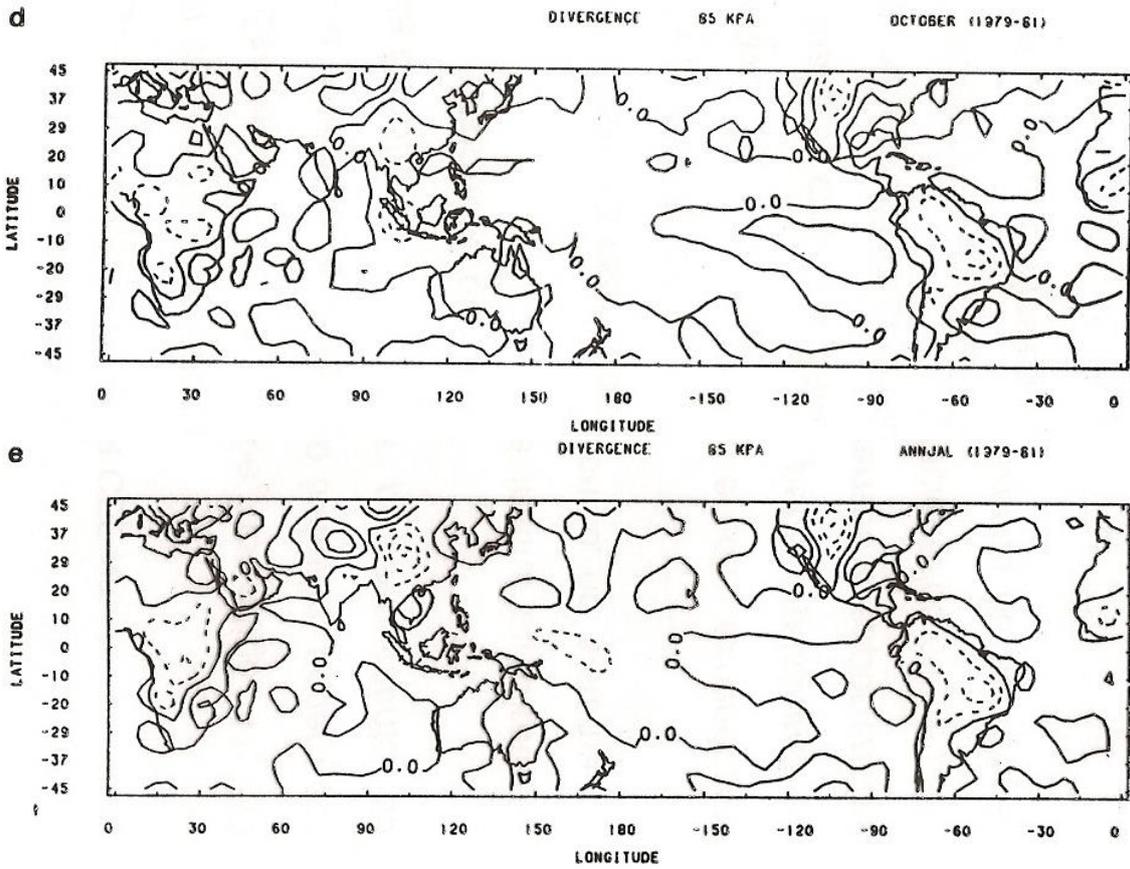


FIG. 3. Climatological deformation fields at 85 kPa for the year as a whole. The isoline interval is  $5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ .

Figura 14

➤ Campos climatológicos de divergência em 850hPa (Figura 15):



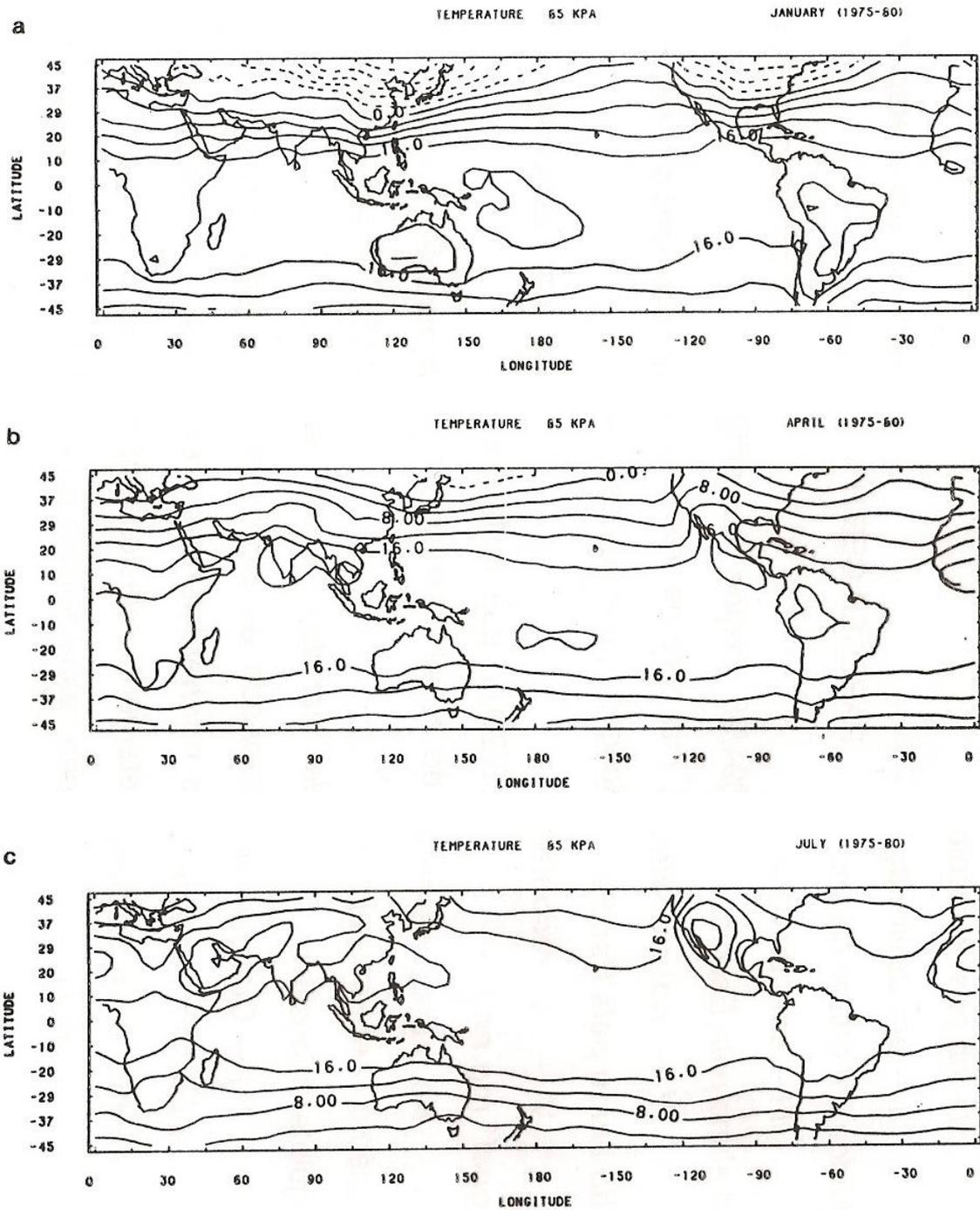


**FIG. 4.** As in Fig. 2 except for the divergence field at 85 kPa. The isoline interval is  $10^{-6} \text{ s}^{-1}$ .

*Figura 15:*

- ✓ Note as regiões de convergência associadas à ZCAS, ZCPS e ZCIS e suas respectivas alterações ao longo do ano.

➤ Campos climatológicos de temperatura (Figura 16):



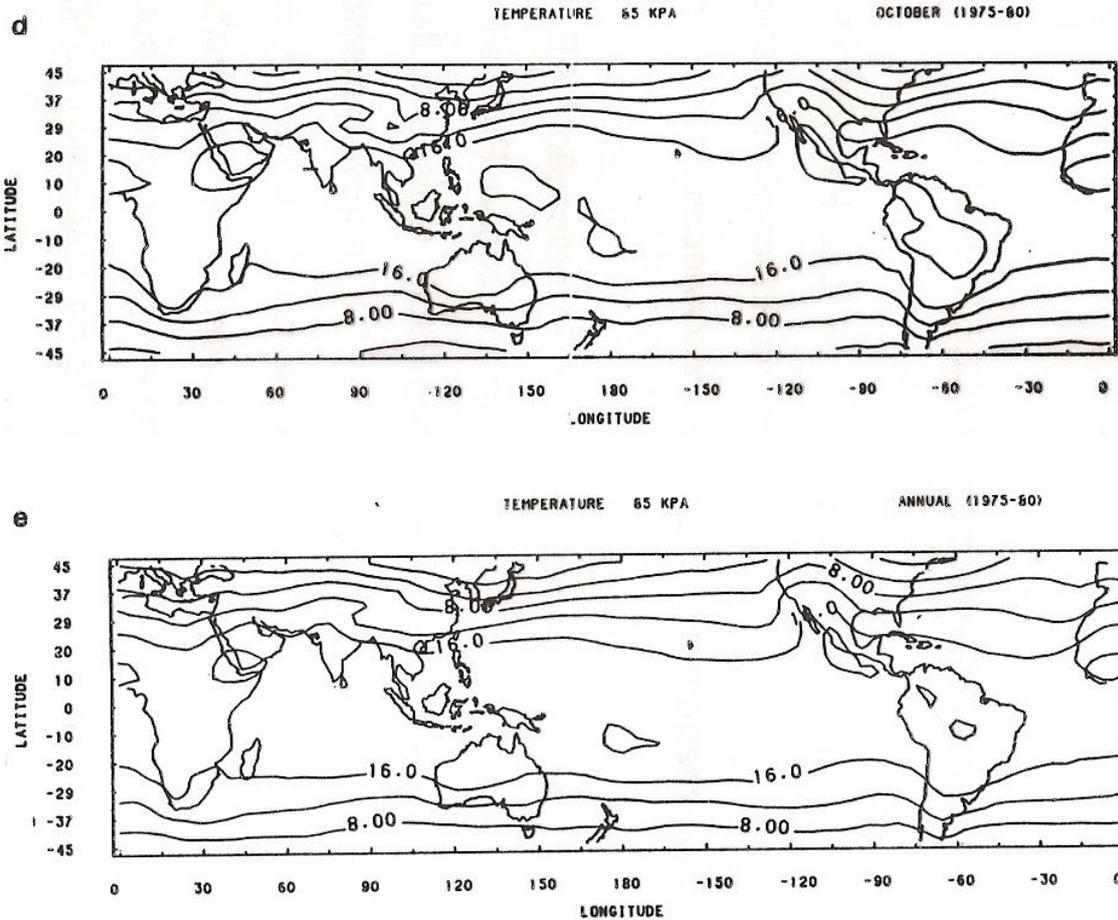


FIG. 5. As in Fig. 2 except for the temperature field. The isoline interval is  $4^{\circ}\text{K}$ .

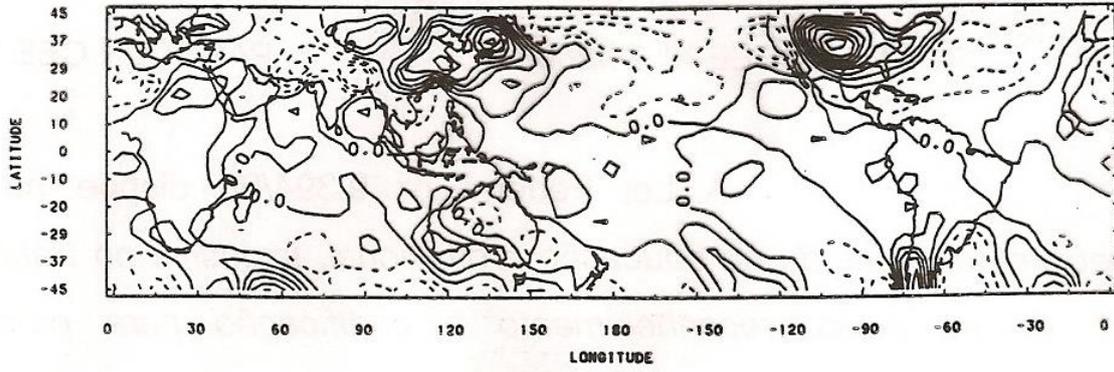
*Figura 16:*

- ✓ Observe gradientes meridionais de temperatura sobre América do Sul, caracterizada por considerável atividade frontal no HS.
- ✓ Campos climatológicos de função frontogênica (Figura 17):

a

FRONTOGENETIC FUNCTION 85 KPA

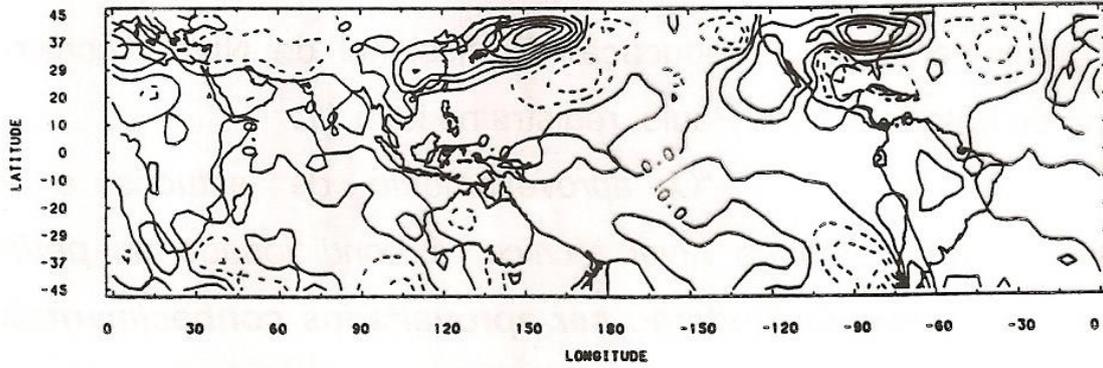
JANUARY (1975-80)



b

FRONTOGENETIC FUNCTION 85 KPA

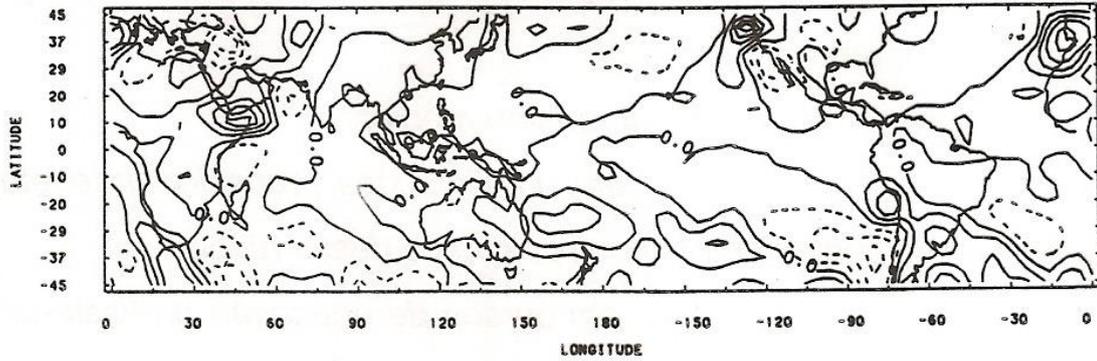
APRIL (1975-80)



c

FRONTOGENETIC FUNCTION 85 KPA

JULY (1975-80)



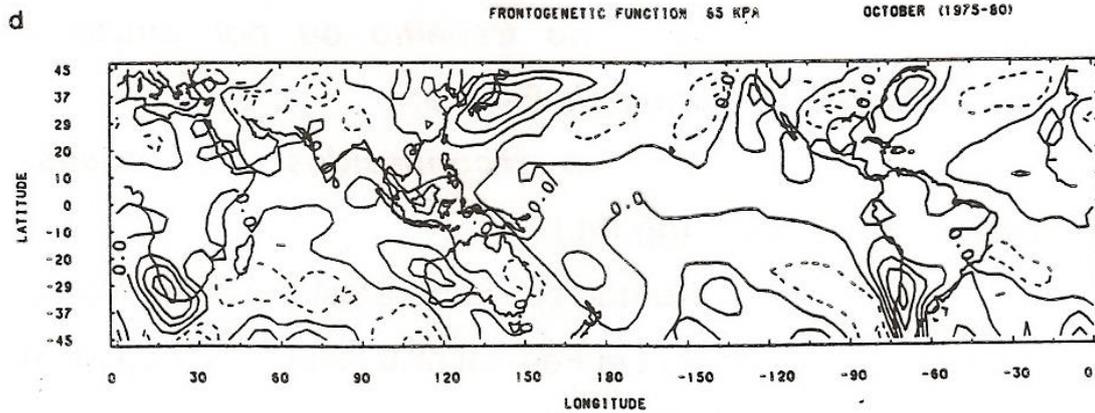


FIG. 6. Climatological frontogenetic function at 85 kPa for the four months, (a) January; (b) April; (c) July and (d) October. The negative isolines represent frontolysis. The isoline interval is  $5 \times 10^{-12} \text{ K m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ .

*Figura 17:*

- ✓ As linhas contínuas representam frontogênese e as tracejadas, frontólise;
- ✓ No HS a frontogênese é bem menos intensa do que no HN;
- ✓ Note a orientação noroeste-sudeste das regiões frontogenéticas no HS; existe certa correspondência entre essas e as conhecidas zonas de convergência do HS;
- ✓ A região equatorial, devido aos pequenos gradientes de temperatura não é frontogeneticamente ativa;
- ✓ A América do Sul é a única região do HS que apresenta condições frontogenéticas quase o ano todo;
- ✓ A região frontogenética mais intensa em Janeiro está situada no sul da Argentina e migra para norte em Julho ocupando o noroeste da Argentina e vizinhança.

### **Peter H. Stone (1966):**

- O autor parte da sugestão de Bergeron que afirma que a frontogênese atmosférica é causada pelo campo de deformação do vento horizontal atuando em um pré-existente gradiente de temperatura horizontal;
- Partindo disso, foi formulado um modelo matemático tridimensional dependente do tempo, os processos dissipativos foram negligenciados e as equações foram aproximadas de maneira que o número de Richardson fosse inicialmente grande e pudesse ser obtida uma solução como uma série de perturbação;
- No modelo matemático foi assumido o equilíbrio hidrostático e a equação de Boussinesq (densidade constante);
- Algumas conclusões:
  - ✓ A solução mostra o desenvolvimento de regiões com forte baroclinicidade, alta estabilidade estática e pronunciada circulação vertical, a qual apresenta em acordo com as observações. O modelo também esclarece o rápido desenvolvimento de frontogêneses observadas na atmosfera;
  - ✓ De maneira geral ele conclui que as propriedades das frentes atmosféricas são bem representadas pelo seu modelo. Esta concordância sugere a grande importância do campo de deformação do vento horizontal para o desenvolvimento de frentes.

**Christopher L.; Peter T. May; Robert A. Vincent (2000):**

- O artigo descreve um algoritmo de detecção de zonas frontais a partir de seções "tempo-altura" do vento horizontal obtidas de medidas de perfilador de vento;
- O algoritmo identifica regiões com:
  - Forte gradiente horizontal de temperatura, estimado pelo vento térmico quase-geostrófico;
  - Forte incremento no tempo da razão "sinal-ruído" no intervalo de resolução do perfilador ("range gate");
  - Forte variação no tempo do vento horizontal no "range gate".
- Para identificar o tipo de frente (fria ou quente), examina-se o campo de advecção. É dado mais peso a componente horizontal do gradiente de temperatura do algoritmo;
- O algoritmo apesar de apresentar bons resultados, necessita de um exame subjetivo para separar possíveis zonas frontais de simples ruídos;
- Os autores concluem que o algoritmo é simples, rápido e fácil de ser aplicado a perfis de vento em quaisquer regiões. Quaisquer tipo de zonas frontais podem ser detectadas em tempo real e também podem ser implementados em modelos de previsão.

**Peter R. Bannon (1984):**

- Os autores examinam o papel da estratificação da superfície frontogénica em um ambiente semi-geostrófico.

- Foram feitas duas simulações com diferentes valores de estabilidade estática. As Figuras 1 e 2 mostram as soluções com estabilidade estática de 4 e 2 K Km<sup>-1</sup>, respectivamente. Estas se referem a fortes e fracos casos de estratificação, respectivamente.

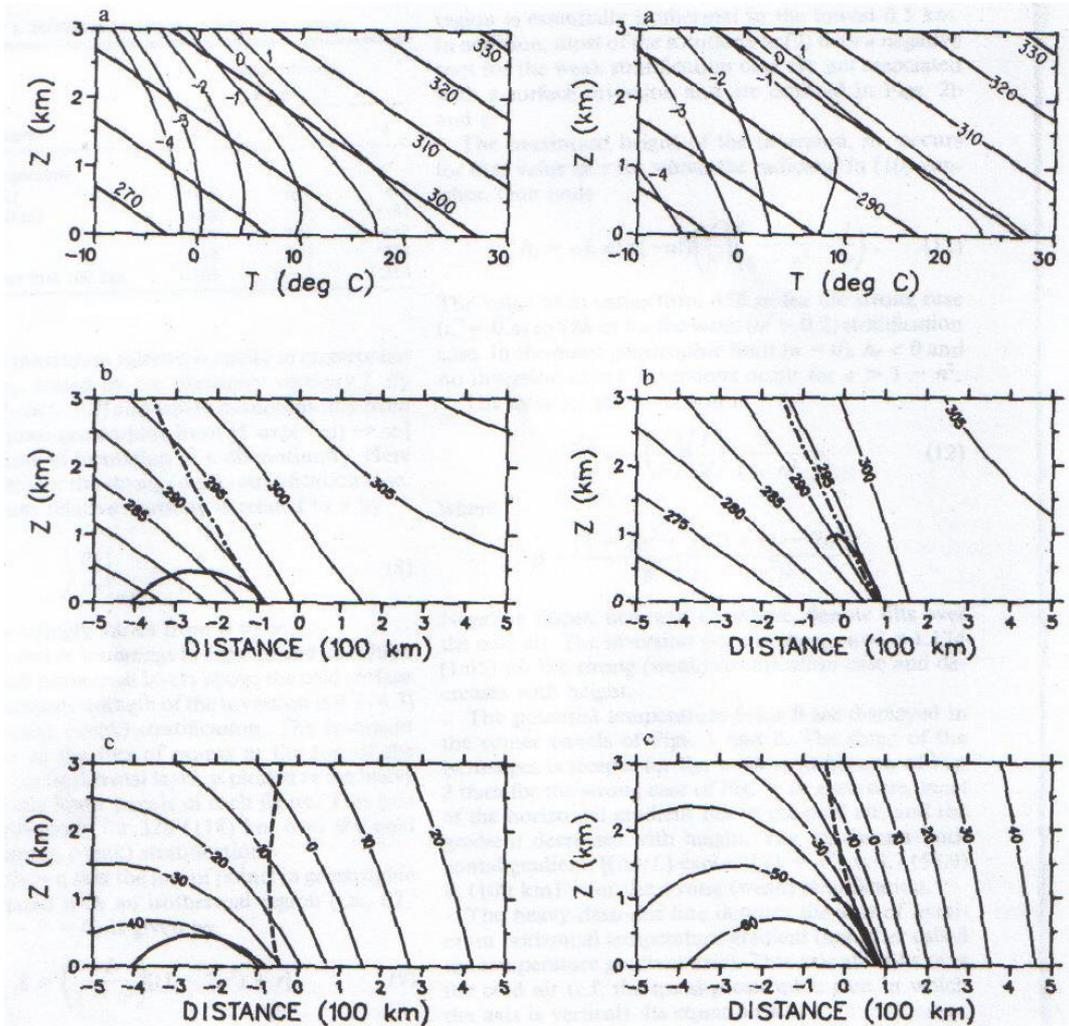


Fig. 1. Model front for a static stability of 4 K km<sup>-1</sup>; the strong stratification case. (a) Temperature soundings at different distances from the surface inversions, labeled in units of 100 km. The heavy sloping straight lines are adiabats labeled in K. (b) The potential temperature field (K). (c) The longfront geostrophic velocity  $v$  (m/s). Positive values denote flow into the paper. Heavy solid curve in (b) and (c) is the inversion axis. Heavy dash-dot and dashed lines are the axes of maximum horizontal temperature gradient and maximum vertical vorticity, respectively.

Fig. 2. As in Fig. 1, but for a static stability of 2 K km<sup>-1</sup>; the weak stratification case.

Figura 18:

- A Tabela 1 mostra o efeito da estratificação na inversão frontal:

**TABLE 1. Stratification effects on frontal inversion.**

Feature	Static stability (K km <sup>-1</sup> )		
	2	3	4
Maximum temperature difference (K)	4.3	0.7	0.5
Displacement (km)	+88	-5	-81
Height (m)	988	482	452
Length (km)	118	204	328
Mean slope over first 100 km	1:108	1:213	1:253

- O resultado do modelo mostra que a estratificação do ambiente afeta a estrutura e as características do desenvolvimento de superfícies frontais;
- Frentes geradas pelo modelo em regiões de grande estabilidade estática são mais fracas, possui inversões frontais com maior inclinação gradual e propagam mais lentamente para o ar quente;
- Fisicamente, estas diferenças ocorrem porque a estratificação modula a intensidade do campo de deformação vertical ageostrófico induzido (Teorema de Taylor-Proudman);
- Alguns resultados obtidos sugerem que frentes quentes (frias) estão associadas com forte (fraca) estratificação. Esta hipótese está de acordo com o trabalho de Hoskins e Heckley (1981) e com a estrutura do crescimento de ondas baroclínicas;

- Conclui-se que a estabilidade estática modula a estrutura, a propagação e a razão de intensificação do desenvolvimento de frentes.

## **Questionário**

- 1) Refaça o esquema da Teoria da frente polar para o HS.
- 2) Qual a definição mais elegante para a frontogênese? E frontólise?
- 3) Qual a velocidade média de uma frente fria?
- 4) Como você entende a variação dos deslocamentos das frentes frias? (Dica: avalie os sistemas de meso e larga escalas para bem como as várias estações do ano).
- 5) As frentes frias têm estação do ano preferencial para ocorrer? Por que? Avalie a região sul e sudeste do Brasil.

## **Referências**

IV Curso de Interpretação de Imagens e Análise Meteorológica, UNIVAP, Outubro de 1995.

Christopher Lucas, Peter T. May, Robert A. Vincent, 2000: An Algorithm for the Detection of Fronts in Wind Profiler Data., WF, Vol 16, pp 234-247.

CLIMANÁLISE ESPECIAL - Edição Comemorativa de 10 anos, Outubro de 1996, MCT/INPE/CPTEC.

Holton, J.R. An Introduction to Dynamic Meteorology, 3rd edition.

Hoskins & Bretherton, 1972, JAS, 29, 11-37.

KOUSKY, V. E.; ELIAS, M. Meteorologia Sinótica: Parte 1. INPE – 2605 – MD/021, pp 107, 1982.

MARENGO, J.; CORNEJO, A.; SATYAMURTY, P.; NOBRE, C.; SEA, W. Cold surges in tropical and extratropical South America: The strong event in June 1994. Monthly Weather Review, 125, 2759-2786, 1977.

Peter R. Bannon, 1984: Effects of Stratification on Surface Frontogenesis: Warm and Cold Fronts., JAS, Vol 41, No 12, pp 2021-2026.

Peter H. Stone, 1966: Frontogenesis by Horizontal Wind Deformation Fields., JAS, Vol 23, No 5, pp 455-465.

Prakki Satyamurty, Mattos L. F., 1989: Climatological Lower Tropospheric Frontogenesis in the Midlatitudes Due to Horizontal Deformation and Divergence., MWR, Vol 117, No 6, pp 1355-1364.

WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V. Atmospheric Science: An Introductory Survey. New York, Academic Press, 1977.

*Sites:*

[http://www.dca.iag.usp.br/www/material/ritaynoue/aca-0422/2009\\_aulas%20amanda/](http://www.dca.iag.usp.br/www/material/ritaynoue/aca-0422/2009_aulas%20amanda/) (acessado em 12/08/10)