



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE RECURSOS NATURAIS PROGRAMA DE
GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

**CLASSIFICAÇÃO DE FRENTES FRIAS POLARES,
FRENTES SUBTROPICAIS E CAVADOS
BAROCLÍNICOS QUE ATINGEM O BRASIL**

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO

Amanda Caroline de Souza

Itajubá, MG, Brasil

2017

**CLASSIFICAÇÃO DE FRENTES FRIAS POLARES,
FRENTES SUBTROPICAIS E CAVADOS BAROCLÍNICOS
QUE ATINGEM O BRASIL**

por

Amanda Caroline de Souza

Monografia apresentada à comissão examinadora Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas da Universidade Federal Itajubá (UNIFEI, MG), como requisito parcial para obtenção do grau de
Bacharel em Ciências Atmosféricas.

Orientador: Prof(a). Dra. Michelle Simões Reboita

Itajubá, MG, Brasil

2017

**Universidade Federal de Itajubá
Instituto de Recursos Naturais
Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a
Monografia

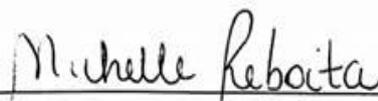
**CLASSIFICAÇÃO DE FRENTES FRIAS POLARES, FRENTES
SUBTROPICAIS E CAVADOS BAROCLÍNICOS QUE ATINGEM O
BRASIL**

elaborada por

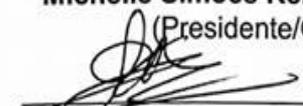
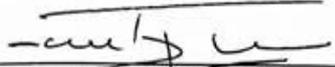
Amanda Caroline de Souza

Como requisito parcial para a obtenção do grau de
Bacharel em Ciências Atmosféricas

Comissão Examinadora:



Michelle Simões Reboita, Dr.^a (UNIFEI)
(Presidente/Orientador)


Gustavo Carlos Juan Escobar, Dr. (CPTEC/INPE)
Marcelo de Paula Corrêa, Dr. (UNIFEI)

Itajubá, 07 de novembro de 2017.

Dedico este trabalho aos meus pais, que sempre acreditaram em mim,
me incentivaram e batalharam para que eu realizasse o sonho de
formar em uma universidade. Esta conquista é para vocês.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois os planos Dele são maiores que os meus sonhos e por nunca ter me desamparado nas vezes em que pedi sua benção. Agradeço à minha família, pois ela é a base de tudo que sou.

Agradeço aos meus professores por tantos ensinamentos, conversas, paciência e principalmente pela amizade. Em especial, agradeço a minha orientadora Michelle por ter me acolhido em sua área de atuação sem hesitar, sempre ensinando com boa vontade e dedicação, sempre aberta as minhas dúvidas e sugestões. Obrigada Mi por ter me indicado ao Dr. Escobar para a IC no INPE antes mesmo de ter feito a disciplina de Sinótica, pois foi a partir daí que me encontrei na Meteorologia, e claro, obrigada Dr. Escobar pelos ensinamentos, paciência e por ter se tornado uma referência de excelente profissional em minha vida. Obrigada Professor Marcelo por todas as portas que tem me aberto, por ter me dado à chance de mostrar meu potencial estagiando em uma empresa privada que hoje se tornou meu sonho de conquista profissional. Obrigada Vanessa por ter me segurado no curso nas vezes que pensei em desistir, sempre me incentivando a continuar. Agradeço ao meteorologista Willians Bini por tanto apoio, ensinamentos, e disponibilização de dados da Somar Meteorologia para contribuir na execução deste trabalho.

Agradeço aos meus sinceros amigos, que fizeram dessa caminhada um pouco menos dolorosa. Will, Dani, André, Matias, Diogo e Matheus, aqueles com quem construí uma amizade e quem me acompanhou durante toda a jornada na Unifei. Ana Flávia, João e Gabriel, vocês que foram minha base nesse último ano e motivo de tantas risadas boas. Obrigada meus amigos por todos os momentos divertidos, pelas tardes e noites debruçados nos livros, pelos áudios no whatsapp com explicações de exercícios, enfim, obrigada por terem sido parte de mim e a melhor parte desses meus 5 anos em Itajubá.

Agradeço a todas as pessoas que moraram comigo nesses anos, nessas 3 repúblicas, pois a convivência no dia a dia é a parte mais difícil e que mais agrega em nossas vidas. Obrigada por terem aguentado meu jeito difícil de lidar, pelos inúmeros momentos felizes e difíceis que conseguimos superar. Vocês eram a minha família, as pessoas com quem eu podia contar, as pessoas que eu dava todo o meu carinho e dedicação, sentirei muita falta de vocês.

“Mesmo quando tudo pede um pouco mais de calma
Até quando o corpo pede um pouco mais de alma
A vida não para
... E o mundo vai girando cada vez mais veloz
A gente espera do mundo e o mundo espera de nós
Um pouco mais de paciência.
(...)”

Paciência...”

Lenine, 1999.

RESUMO

Monografia de Graduação
Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Itajubá, MG, Brasil

CLASSIFICAÇÃO DE FRENTES FRIAS POLARES, FRENTES SUBTROPICAIS E CAVADOS BAROCLÍNICOS QUE ATINGEM O BRASIL

AUTOR(A): AMANDA CAROLINE DE SOUZA
ORIENTADOR: MICHELLE SIMÕES REBOITA

Local e Data da Defesa: Sala Multiuso A IRN, 07 de novembro de 2017

Os sistemas frontais e cavados baroclínicos causam alterações no tempo e, por isso, são monitorados pelos centros de Meteorologia. No entanto, ainda hoje há bastante confusão quando se trata da classificação de sistemas frontais clássicos, subtropicais e de cavados baroclínicos. Nesse sentido, o objetivo do presente estudo foi classificar os três tipos de sistemas no Brasil durante o período de 2010 a 2016. Para isso, foram utilizadas cartas sinóticas (geradas com dados de análises do GFS) disponibilizadas pelo CPTEC/INPE, imagens do satélite GOES-12 no canal temperatura de brilho realçada das nuvens, assim como dados de pressão ao nível médio do mar e componentes zonal e meridional do vento. Entre os resultados têm-se que em Porto Alegre/RS há ocorrência de frentes frias polares durante todo o ano, maior ocorrência de frentes subtropicais na primavera e o maior número de cavados baroclínicos nos meses de março e novembro. Os cavados baroclínicos são os sistemas mais frequentes em São Paulo/SP, Rio de Janeiro/RJ e Vitória/ES. Obteve-se também que em São Paulo/SP, os maiores volumes de chuva ocorrem quando há passagem de frentes frias polares clássicas e/ou cavados baroclínicos.

Palavras-chave: frentes frias, frentes subtropicais, cavados baroclínicos.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Representação esquemática das principais trajetórias das frentes frias no sul da América do Sul.....	13
FIGURA 2 – Carta sinótica de altitude e em níveis médios com características de uma frente fria polar clássica.....	15
FIGURA 3 – Carta sinótica de baixos níveis e de superfície com características de uma frente fria polar clássica.....	16
FIGURA 4 – Imagem do satélite GOES-12 com características de uma frente fria polar clássica.....	17
FIGURA 5 – Imagem do GRADS mostrando o comportamento de variáveis meteorológicas caracterizando um frente fria polar clássica.....	17
FIGURA 6 – Carta sinótica de altitude e em níveis médios com características de uma frente subtropical.....	19
FIGURA 7 – Carta sinótica de baixos níveis e de superfície com características de uma frente subtropical.....	20
FIGURA 8 – Imagem do satélite GOES-12 com características de uma frente subtropical.....	21
FIGURA 9 – Imagem do GRADS mostrando o comportamento de variáveis meteorológicas caracterizando uma frente subtropical.....	21
FIGURA 10 – Esboço esquemático de uma frente fria polar clássica e de um cavado baroclínico.....	23
FIGURA 11 - Carta sinótica de altitude e em superfície com características de um cavado baroclínico.....	24
FIGURA 12 – Imagem do satélite GOES-12 com características de um cavado baroclínico.....	25
FIGURA 13 – Imagem do GRADS mostrando o comportamento de variáveis meteorológicas caracterizando um cavado baroclínico.....	25
FIGURA 14 – Mapa do Brasil com as cidades em estudo.....	32
FIGURA 15 - Diagrama elaborado para o mês de agosto de 2011, mostrando o deslocamento dos sistemas passando pelas cidades em estudo colocadas por ordem de latitude.....	33

FIGURA 16 - Distribuição do número total de frentes frias polares clássicas, frentes subtropicais e cavados baroclínicos desde 2010 a 2016.....	35
FIGURA 17 - Distribuição do número total de frentes frias polares, frentes subtropicais e cavados baroclínicos desde 2010 a 2016, mostrando a quantidade de registros mensais.....	37
FIGURA 18 – Distribuição média sazonal de frentes frias polares, frentes subtropicais e cavados baroclínicos desde 2010 a 2016	38
FIGURA 19 – Comparação entre o número de ocorrências de frentes frias polares, frentes subtropicais e cavados baroclínicos entre a estação chuvosa e a estação seca.....	39
FIGURA 20 – Total de precipitação em São Paulo de 2010 a 2016.....	41
Figura 21 – Total de precipitação em mm durante todo o período de estudo (2010 a 2016), mostrando o percentual de chuva sobre cada sistema frontal ou cavado baroclínico.....	41

LISTA DE ABREVIACÕES

BA - Bahia

CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

DHN – Diretoria de Hidrografia e Navegação

DJF – Dezembro, janeiro, fevereiro

ES – Espírito Santo

GOES - Geostationary Operational Environmental Satellite

GFS - Global Forecast System

GPT - Grupo de Previsão de Tempo

GRADS - Grid Analysis and Display System

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

JJA – Junho, Julho, Agosto

MAS – Modo anular sul

MAM – Março, abril, maio

NCEP - National Centers for Environmental Prediction

PA – Porto Alegre

PNMM – Pressão ao nível médio do mar

REMO - Rede de Modelagem e Observação Oceanográfica

REGCM – Modelo regional

RJ – Rio de Janeiro

SON – Setembro, outubro, novembro

SP – São Paulo

ZCAS - Zona de Convergência do Atlântico Sul

ZCOU - Zona de Convergência de Umidade

SUMÁRIO

<i>LISTA DE FIGURAS</i>	<i>i</i>
<i>LISTA DE ABREVIACÕES</i>	<i>ii</i>
<i>1.INTRODUÇÃO</i>	<i>12</i>
<i>2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</i>	<i>14</i>
<i>2.1FRENTES FRIAS POLARES</i>	<i>14</i>
<i>2.2FRENTES SUBTROPICAIS</i>	<i>18</i>
<i>2.3CAVADOS BAROCLÍNICOS</i>	<i>22</i>
<i>2.4CLIMATOLOGIA DE FRENTES FRIAS NA AMÉRICA DO SUL</i>	<i>26</i>
<i>3.MATERIAL E MÉTODOS</i>	<i>29</i>
<i>3.1IDENTIFICAÇÃO DOS SISTEMAS</i>	<i>29</i>
<i>3.2 ESTATÍSTICAS</i>	<i>34</i>
<i>3.3 PRECIPITAÇÃO</i>	<i>34</i>
<i>4.RESULTADOS</i>	<i>35</i>
<i>4.1 FREQUÊNCIA ANUAL DE SISTEMAS FRONTAIS E CAVADOS BAROCLÍNICOS POR CIDADE</i>	<i>35</i>
<i>4.2FREQUÊNCIA MENSAL E SAZONAL</i>	<i>36</i>
<i>4.3 SISTEMAS DURANTE A ESTAÇÃO SECA E CHUVOSA NO SUDESTE DO BRASIL</i>	<i>38</i>
<i>4.4 CHUVA DECORRENTE DE UM SISTEMA FRONTAL OU CAVADO BAROCLÍNICO EM SÃO PAULO</i>	<i>39</i>
<i>5.CONCLUSÃO</i>	<i>42</i>
<i>6.REFERÊNCIAS</i>	<i>43</i>

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas frontais frios são sistemas meteorológicos que modificam o tempo sobre as latitudes extratropicais e subtropicais e que, em comprimento, se classificam como sistemas de escala sinótica e, em largura, como de mesoescala (Holton, 2004). Os sistemas frontais podem causar aumento da nebulosidade, chuva, variações na direção e intensidade do vento e mudanças bruscas na temperatura. As frentes frias polares, também chamadas de clássicas, são regiões de convergência de massa. A teoria das frentes foi consolidada por Bjerknes (1919) e Bjerknes e Solberg (1922).

As frentes frias que atingem o Brasil apresentam diferentes trajetórias (ANDRADE, 2005). As frentes frias que apresentam uma trajetória mais zonal (Figura 1) se deslocam principalmente pelo oceano Atlântico Sul e podem atingir latitudes baixas como, por exemplo, parte da região Sudeste e o leste da região Nordeste do país. As frentes frias que avançam pelo litoral e penetram em latitudes tropicais e subtropicais, e que vão perdendo contraste térmico (redução do gradiente horizontal de temperatura), conforme avançam para latitudes mais baixas, passam a receber a denominação de frentes subtropicais (KOUSKY, 1979). As frentes subtropicais podem ocorrer a partir da evolução de uma frente fria para subtropical ou ter gênese como subtropical.

Além das frentes frias e subtropicais há outro sistema, os cavados baroclínicos (Sanders 2005), que se parece muito com as frentes e que normalmente é identificado erroneamente nas cartas sinóticas (Sanders, 2005). Os cavados baroclínicos são sistemas com centro de baixa pressão, porém possuem fraco gradiente horizontal de temperatura, podendo ser confundidos com frentes subtropicais. No entanto, os cavados têm características diferentes dos sistemas frontais, pois apresentam um gradiente significativo de umidade, além da nebulosidade e da precipitação se formar na dianteira do sistema (SANDERS, 2005).

Na análise das cartas sinóticas, em geral, os meteorologistas não fazem distinção entre as frentes frias polares (frentes clássicas), frentes subtropicais e cavados baroclínicos. Diante do exposto, o presente estudo tem como objetivo identificar a ocorrência de frentes polares e subtropicais e dos cavados baroclínicos

que atingem o Brasil com base nas variáveis atmosféricas apresentadas nas cartas sinóticas do GPT-CPTEC-INPE entre 2010 e 2016. Destaca-se que foram analisados os campos meteorológicos e não as análises realizadas pelos meteorologistas (cartas sinóticas disponíveis no site <http://img0.cptec.inpe.br/~rgptimg/Produtos-Pagina/Carta-Sinotica/Analise/>), pois o meteorologista traça os sistemas na carta sinótica de forma manual e logo após, um técnico coloca essas informações no mapa de forma digital. O motivo é que os conceitos de frente subtropical e cavado baroclínico foram implementados recentemente pelo Grupo de Previsão de Tempo (GPT). Esses conceitos definidos por Bjerkness, Solberg, Kousky e Sanders, citados acima, são os aplicados no presente estudo.

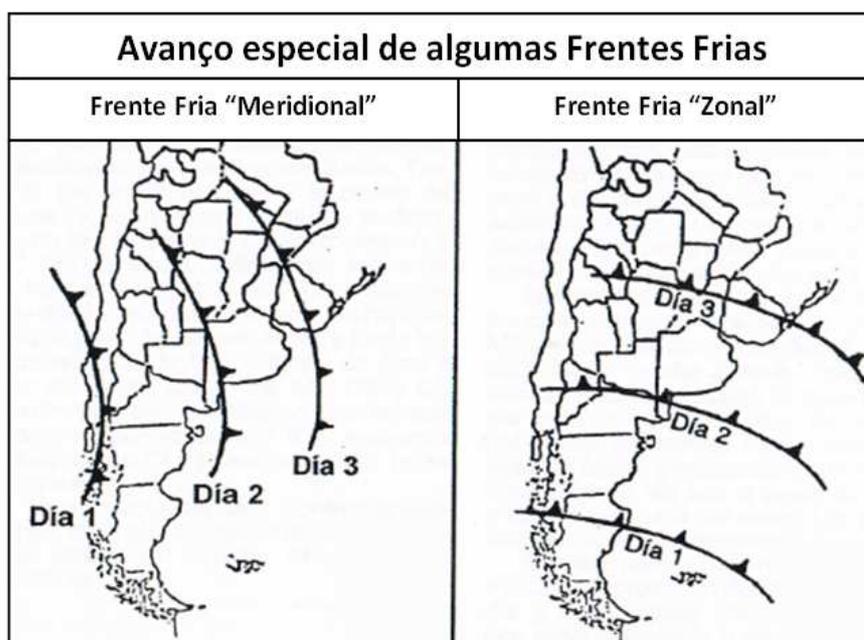


Figura 1 - Representação esquemática das principais trajetórias das frentes frias no sul da América do Sul. Adaptado de Celemín (1984).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. FRENTES FRIAS POLARES

O primeiro modelo conceitual aceito sobre frentes polares ou frentes “clássicas” foi o proposto por Bjerknes em 1919. O modelo conceitual mostrava duas regiões de convergência de massa, chamadas de frente fria e frente quente. Com a colaboração de Solberg em 1922, foi descrito que os ciclones extratropicais são formados ao longo de uma linha que apresenta descontinuidade, chamada de frente polar, na qual separa uma massa de ar polar mais densa de outra menos densa (BJERKNES e SOLBERG, 1922). Isso recebeu o nome de teoria da Frente Polar, onde ciclones de latitudes médias se formam nas fronteiras do ar quente e o frio.

Um exemplo de formação de frente fria polar “clássica” é mostrado nas Figuras 2, 3 e 4. A Figura 2 mostra que há a presença bem definida do ramo norte do jato polar em 250 hPa, no qual está associado à frente fria em superfície. Além disso, o jato subtropical pode aparecer acoplado ao ramo norte do jato polar. Essa região dos jatos em 250 hPa é caracterizada por ventos intensos em níveis médios (500 hPa) e altos (250 hPa) da atmosfera. Na ocorrência de uma frente polar, os gradientes horizontais de temperatura do ar em superfície são muito intensos (linhas muito próximas) indicando grande variação da temperatura do ar numa área pouco extensa. Esses gradientes podem ser representados pela espessura da camada 500/1000 hPa (Figura 3). Além disso, as isóbaras mostram um acentuado gradiente de pressão e quebras. Justamente acima desses gradientes localiza-se em altitude o ramo norte do jato polar. Algumas das principais características na formação de uma frente fria polar são a nebulosidade e chuva no lado frio (atrás) do sistema em superfície, o que pode ser visto na Figura 4.

Para melhor visualização das principais variáveis meteorológicas que caracterizam uma frente fria polar clássica foram representados em um único campo (Figura 5) a pressão ao nível médio do mar, onde é possível ver a formação de um centro de baixa pressão caracterizando um ciclone, assim como a quebra das isóbaras mostrando a região do ramo frontal frio; a imagem de satélite do canal infravermelho mostrando que a nebulosidade está atrás da frente fria; e os ventos em altos níveis para indicar a posição do jato polar associado à frente fria em superfície.

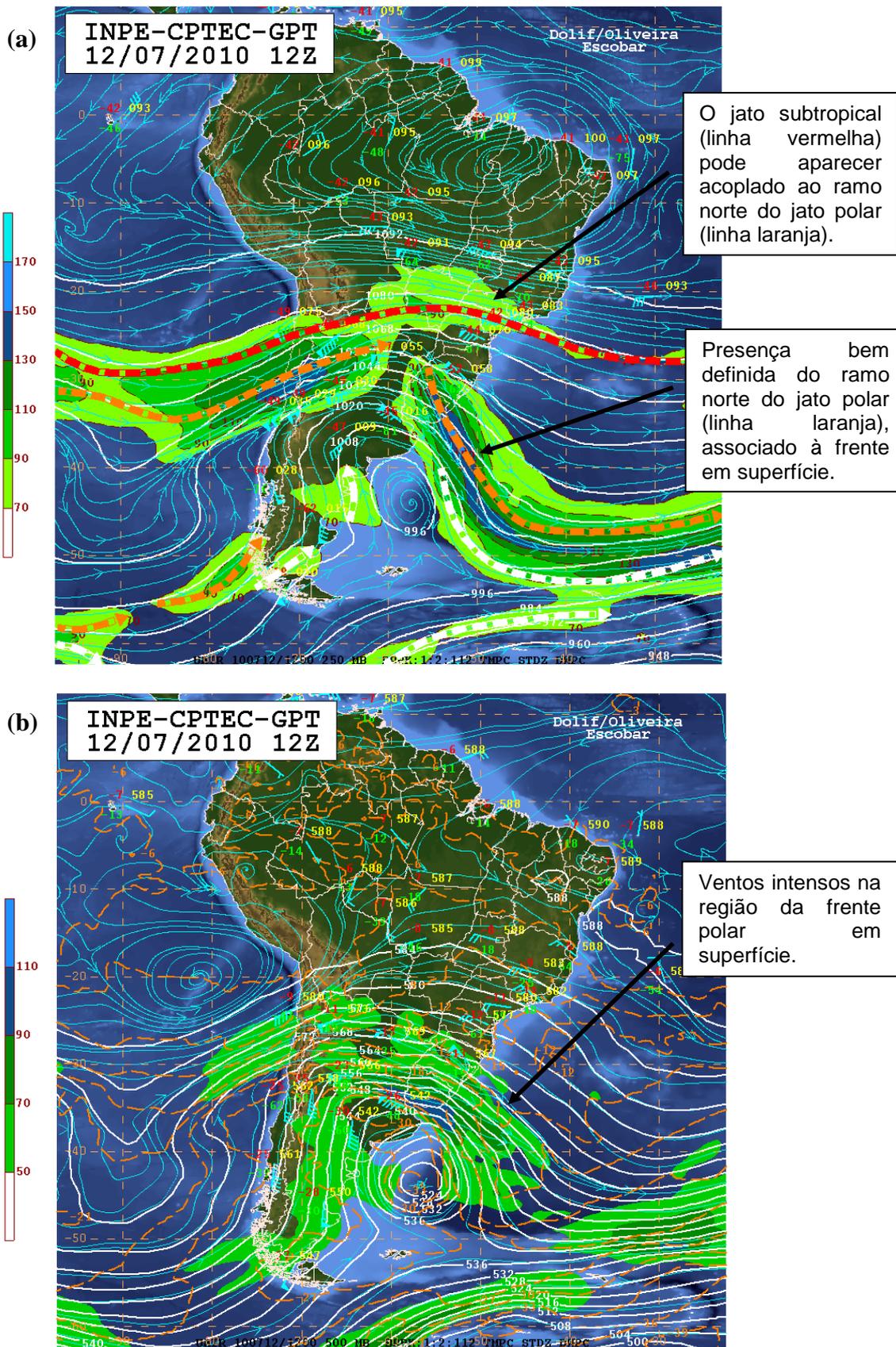


Figura 2 – (a) Carta sinótica de altitude (250 hPa); (b) Carta sinótica em níveis médios (500 hPa).
Fonte: Grupo de Previsão de Tempo do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (INPE-CPTEC-GPT).

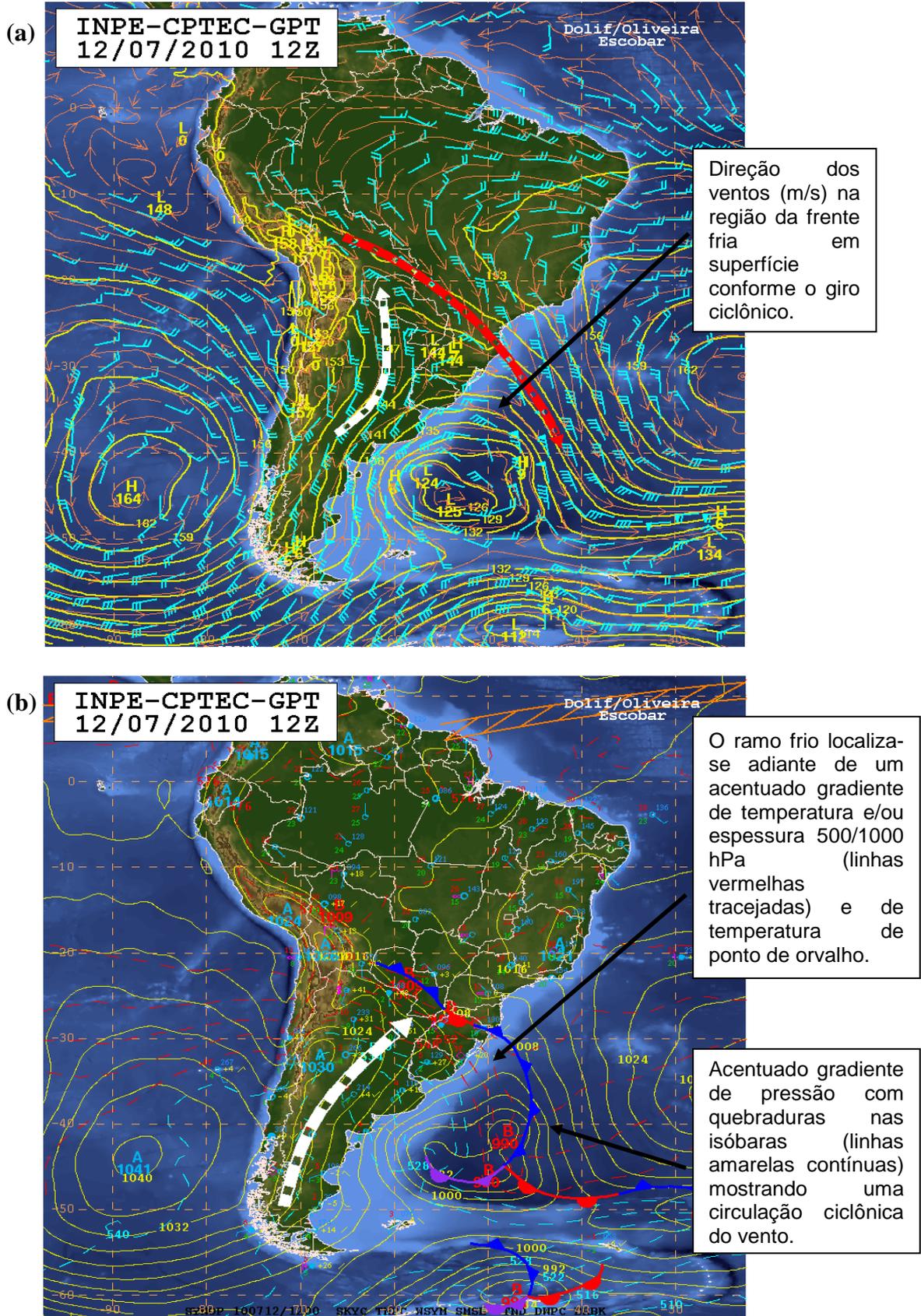


Figura 3 – (a) Carta sinótica em baixos níveis (850 hPa); (b) Carta sinótica de superfície. Fonte: Grupo de Previsão de Tempo do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (INPE-CPTEC-GPT).

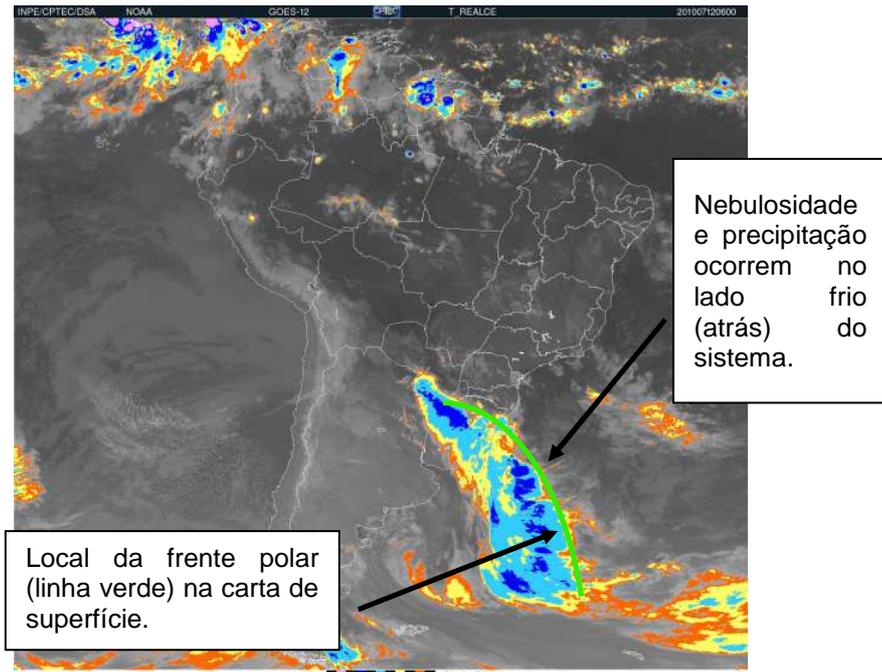


Figura 4 – Imagem do satélite GOES-12 T realçada. Fonte: Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (INPE-CPTEC-DAS).

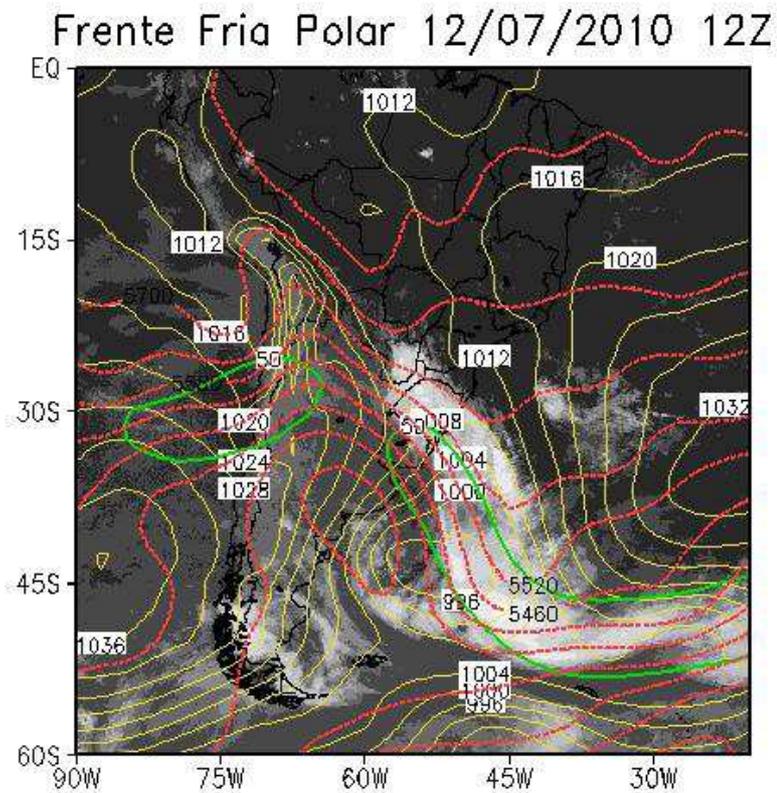


Figura 5 – Imagem de satélite do canal infravermelho indicando a ocorrência de nebulosidade (escala de cinza), linhas de pressão ao nível médio do mar (hPa, linhas em amarelo), região dos jatos, no nível de 250 hPa (linha verde), com a magnitude dos ventos entre 50 e 100 m/s, e a espessura da camada 500/1000 hPa (linhas vermelhas).

2.2. FRENTES SUBTROPICAIS

As frentes subtropicais podem ter gênese subtropical ou ser a evolução de frentes frias polares que se deslocam do sul do continente, sendo principalmente oceânicas, e que perdem contraste térmico conforme avançam para latitudes mais baixas. Assim, uma frente subtropical é aquela que pode ser a transição de uma frente polar que avança sobre a América do Sul, onde mesmo perdendo suas propriedades, continua a trajetória em direção ao nordeste do país, influenciando o tempo de maneira significativa principalmente no Estado da Bahia (KOUSKY, 1979; PAEGLE, 1987), ou que tem gênese nos subtrópicos. A banda de nebulosidade e a precipitação nas frentes subtropicais também ficam atrás do sistema, similar à frente polar clássica. Outra característica importante das frentes subtropicais é que a diferença de uma frente clássica é o gradiente de temperatura de ponto de orvalho que praticamente não existe nessas frentes.

Um exemplo de formação de frente fria subtropical é mostrado nas Figuras 6, 7 e 8. A Figura 6 mostra que não existe a presença de um jato polar associado diretamente com a frente em superfície, porém, quase sempre aparece o jato subtropical. Na região do jato existe um fraco gradiente de temperatura e/ou espessura em superfície, significando fraca baroclinia, além de um fraco gradiente de pressão e isóbaras normalmente sem quebras, o que pode ser visto na Figura 7. A Figura 8 mostra, que de forma similar às frentes frias polares, a nebulosidade e precipitação também ocorrem no lado frio do sistema. Para melhor visualização das principais variáveis meteorológicas que caracterizam uma frente subtropical foram representadas em um único campo (Figura 9) as linhas de pressão ao nível médio do mar, onde é possível ver a formação de um centro de baixa pressão caracterizando um ciclone, porém não há quebra marcante nas isóbaras diferenciando o sistema clássico da frente subtropical mostrada nesta imagem; a imagem de satélite no canal infravermelho mostrando que a nebulosidade está atrás da frente subtropical, o que é parecido com a frente fria polar; e ventos intensos em altos níveis, indicando o jato subtropical, associado à frente subtropical em superfície.

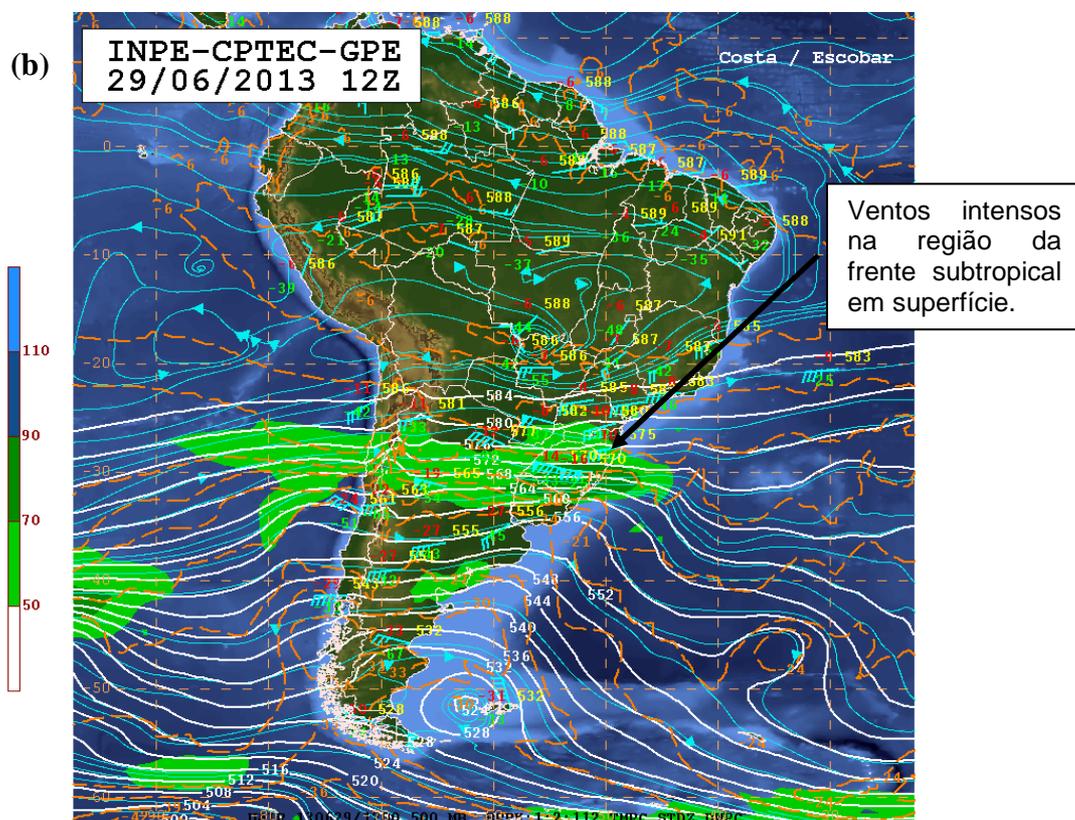
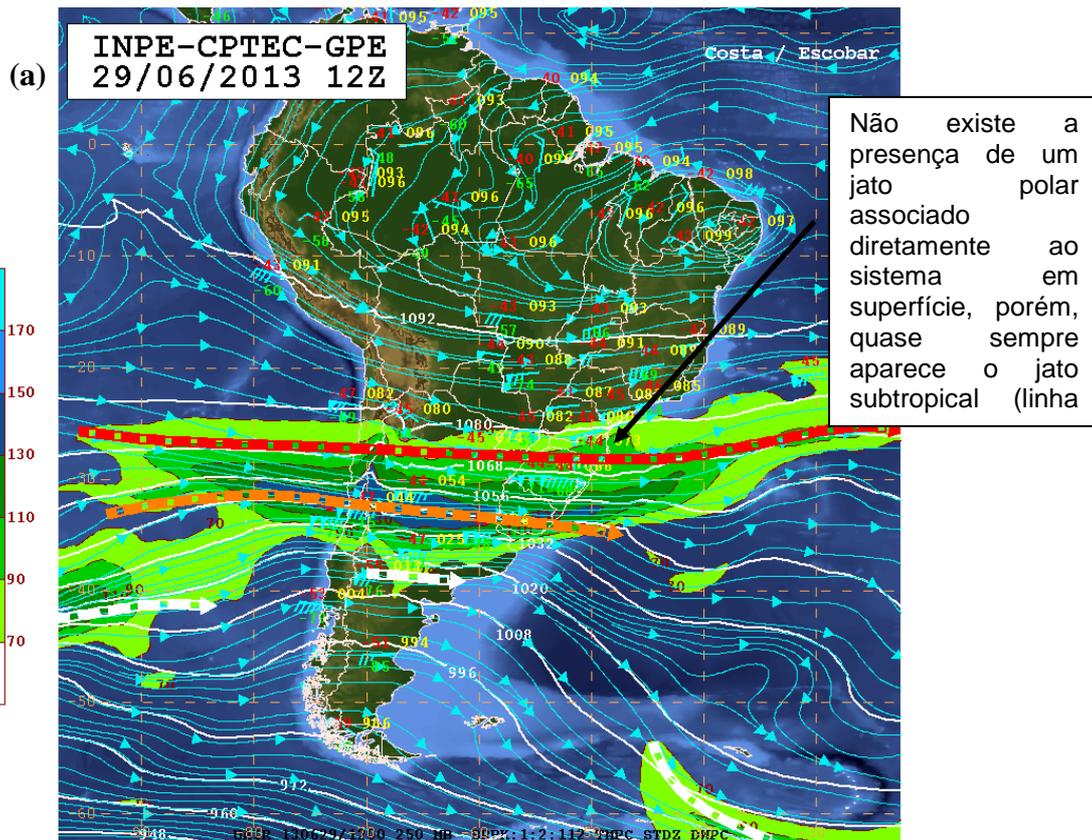
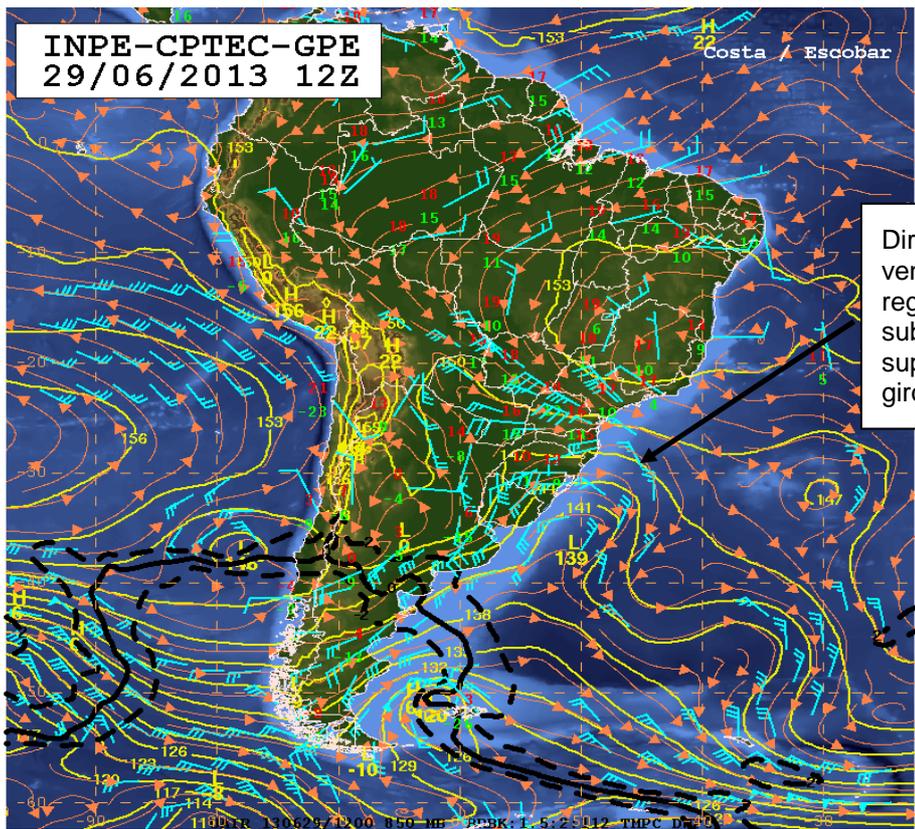


Figura 6 – (a) Carta sinótica de altitude (250 hPa); (b) Carta sinótica em níveis médios (500 hPa).
Fonte: Grupo de Previsão de Tempo do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (INPE-CPTEC-GPT).

(a)



(b)

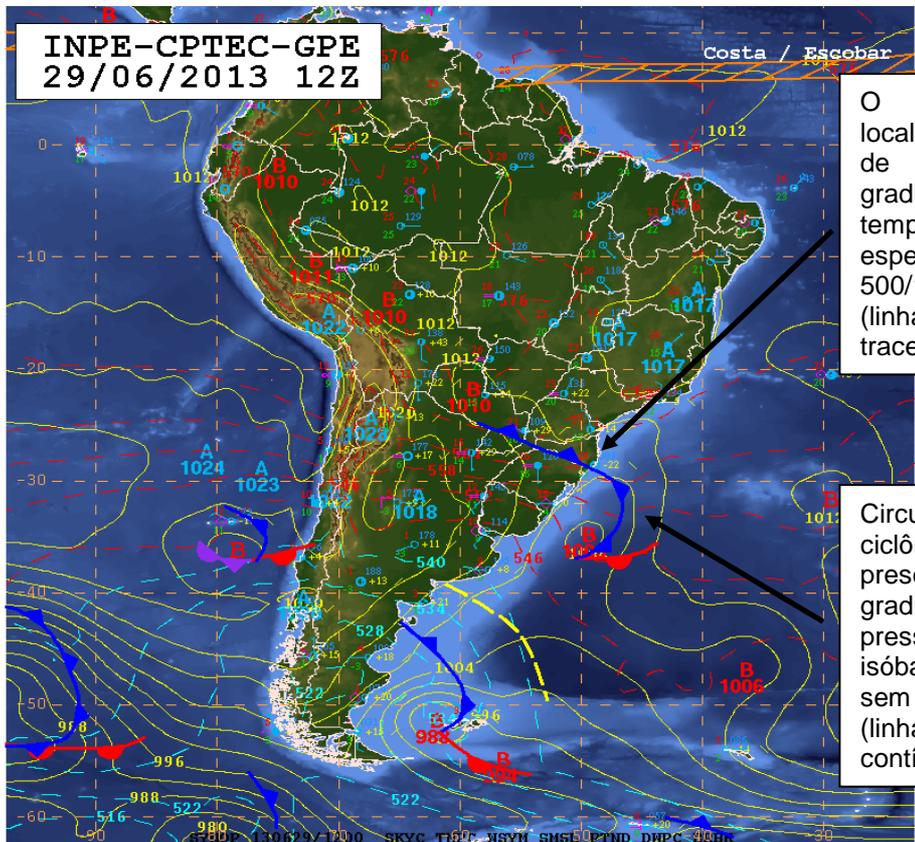


Figura 7 – (a) Carta sinótica em baixos níveis (850 hPa); (b) Carta sinótica de superfície. Fonte: Grupo de Previsão de Tempo do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (INPE-CPTEC-GPT).

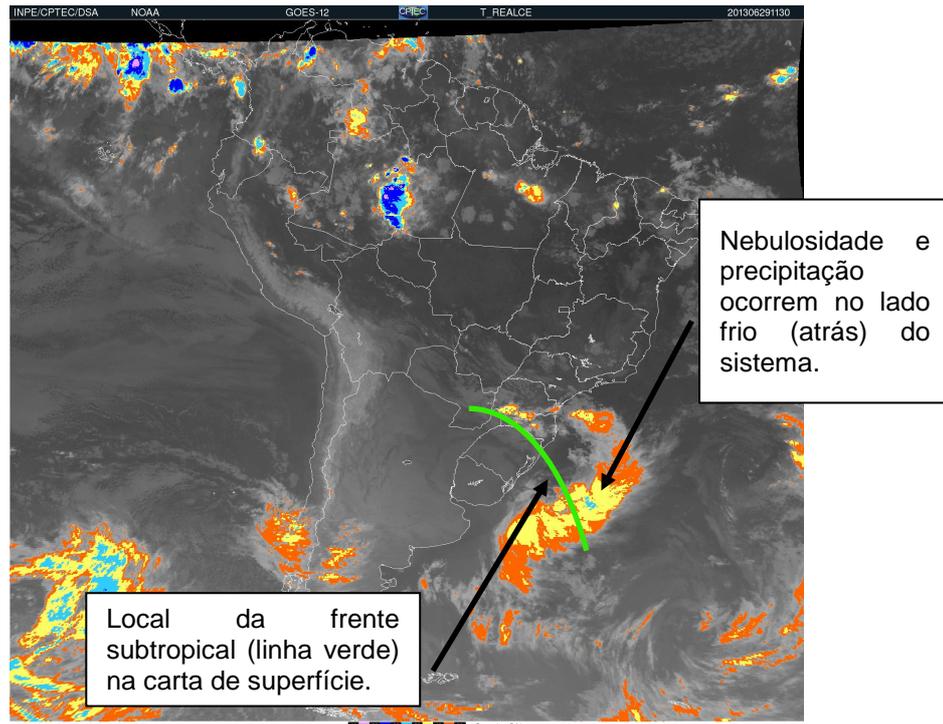


Figura 8 – Imagem do satélite GOES-12 T realçada. Fonte: Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (INPE-CPTEC-DAS).

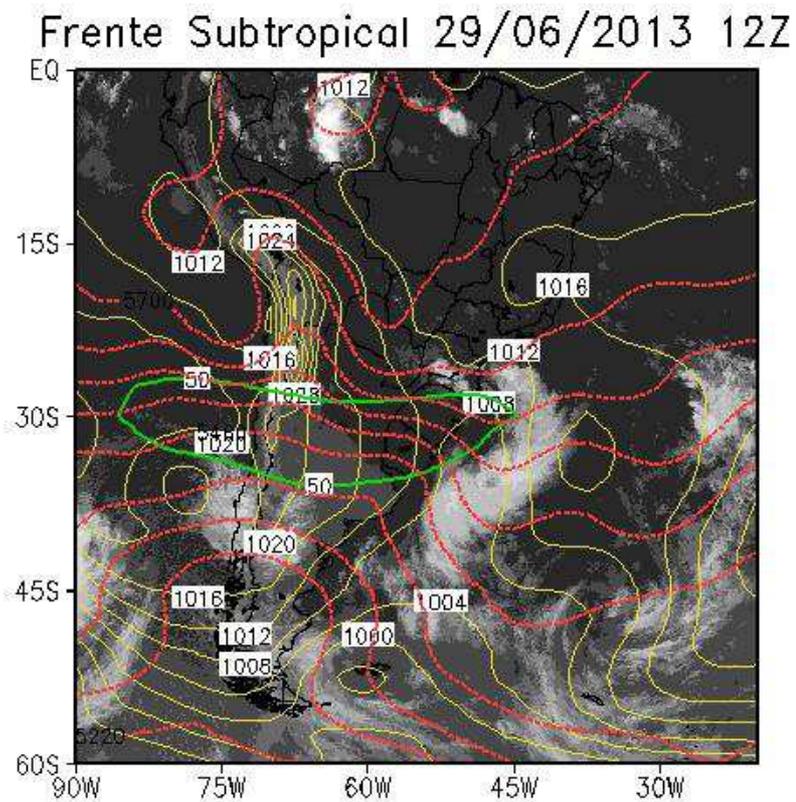


Figura 9 – Imagem de satélite no canal infravermelho indicando a ocorrência de nebulosidade (escala de cinza), linhas de pressão ao nível médio do mar (hPa, linhas em amarelo), região dos jatos, no nível de 250 hPa (linhas em verde), com a magnitude dos ventos entre 50 e 100 m/s e a espessura da camada 500/1000 hPa (linhas vermelhas).

2.3. CAVADOS BAROCLÍNICOS

Os cavados baroclínicos (SANDERS, 2005) são sistemas meteorológicos que também apresentam um fraco gradiente de temperatura em superfície e, com frequência, são confundidos com frentes polares clássicas (BJERKNES e SOLBERG 1922; SANDERS 1999 e 2005; SCHULTZ 2006) ou com frentes subtropicais (KOUSKY, 1979; PAEGLE, 1987). Os cavados baroclínicos representam o ramo frio de um ciclone extratropical cuja baroclinia é fraca, ou seja, que já está perdendo seus contrastes térmicos. Sendo assim, o maior erro dos meteorologistas é marcar o ramo frio e o ramo quente na carta sinótica de superfície ao invés de marcar apenas uma linha tracejada indicando a presença do cavado baroclínico. Devido ao contraste de temperatura do ar em superfície, provocado pelo deslocamento do cavado baroclínico fraco, em várias ocasiões quase não é possível detectá-lo através da temperatura do ar em uma carta sinótica de superfície, sendo apenas possível observar um gradiente de umidade significativo, representado pela temperatura de ponto de orvalho. Outra diferença importante em relação às frentes frias polares e subtropicais é que a nebulosidade e a precipitação ocorrem no setor quente (à frente) do sistema, antes do giro ciclônico do vento (SANDERS, 2005). É importante ressaltar, que em muitas oportunidades, os cavados baroclínicos organizam episódios de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) ou Zona de Convergência de Umidade (ZCOU), isto já seria uma boa indicação do tipo de sistema que está formado em superfície.

A Figura 10 mostra um esquema simples que ajuda a definir as principais diferenças entre frentes e cavados baroclínicos (SANDERS, 2005). A frente fria clássica mostra um maior gradiente de temperatura sobre o lado frio, em relação aos cavados baroclínicos. Por outro lado, a área de chuva se encontra sobre o ar frio no caso da frente clássica e do lado do ar quente no caso dos cavados baroclínicos.

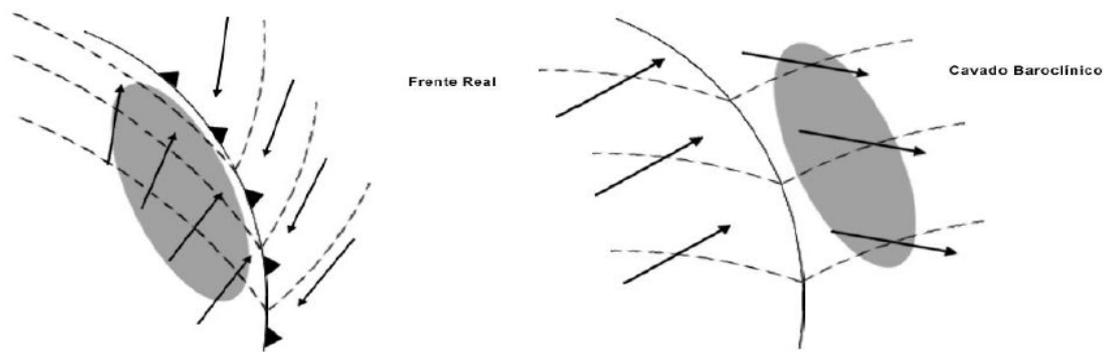


Figura 10 - Ilustração esquemática de (a) uma frente fria e de (b) um cavado baroclínico no Hemisfério Sul. A linha sólida mostra a frente ou o cavado. As linhas tracejadas são isotermas na superfície. As áreas em cinza mostram a localização das nuvens e precipitação, onde no caso de uma frente fria a nebulosidade e precipitação ocorrem atrás do sistema, e no caso de um cavado baroclínico, ocorrem à frente do sistema. Fonte: adaptado de Sanders (2005).

Um exemplo de formação de cavado baroclínico é mostrado nas Figuras 11 e 12. A Figura 11 mostra que em altitude não há jato polar associado diretamente, porém, quase sempre aparece o jato subtropical na região do cavado baroclínico. Também pode ser observado que em superfície existe um fraco gradiente de temperatura e/ou espessura, e que em contrapartida existe um significativo gradiente de umidade, além de que em muitas oportunidades, como nesse exemplo, o cavado baroclínico organiza episódios de ZCAS ou de ZCOU. Uma das principais diferenças entre os sistemas frontais e o cavado baroclínico que podem ser observadas com facilidade são a nebulosidade e precipitação ocorrendo à frente do sistema, o que pode ser visto na Figura 12. Para melhor visualização das principais variáveis meteorológicas que caracterizam um cavado baroclínico foram representadas em um único campo (Figura 13) as linhas de pressão ao nível médio do mar, onde é possível ver a formação de um centro de baixa pressão caracterizando um ciclone, porém não há quebra marcante das isóbaras diferenciando o sistema clássico do cavado baroclínico mostrado nesta imagem; a imagem de satélite no canal infravermelho mostrando que a nebulosidade está à frente do sistema, característica importante para distinção entre um cavado e os sistemas frontais; e a região do jato em 250 hPa associado ao cavado baroclínico em superfície. Os cavados baroclínicos definidos por Sanders (2005) se parecem muito com os sistemas frontais, pois também são sistemas com centro de baixa pressão, e normalmente são identificados erroneamente nas cartas sinóticas, onde a análise da carta de superfície mostra de forma não adequada os ramos frio e quente da onda frontal. O correto seria indicar o cavado com linha tracejada.

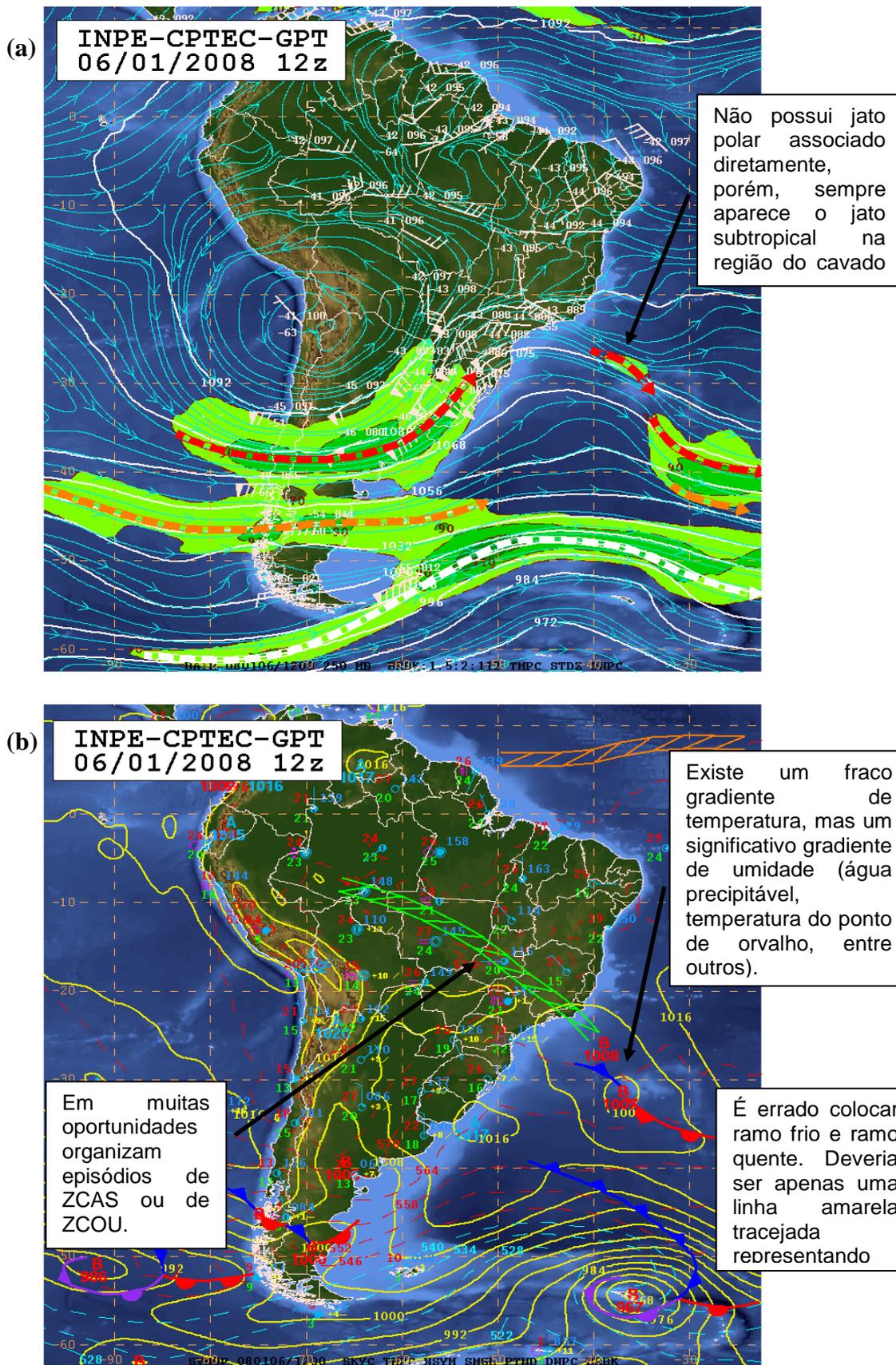


Figura 11 – (a) Carta sinótica de altitude (250 hPa); (b) Carta sinótica de superfície. Fonte: Grupo de Previsão de Tempo do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (INPE-CPTEC-GPT).

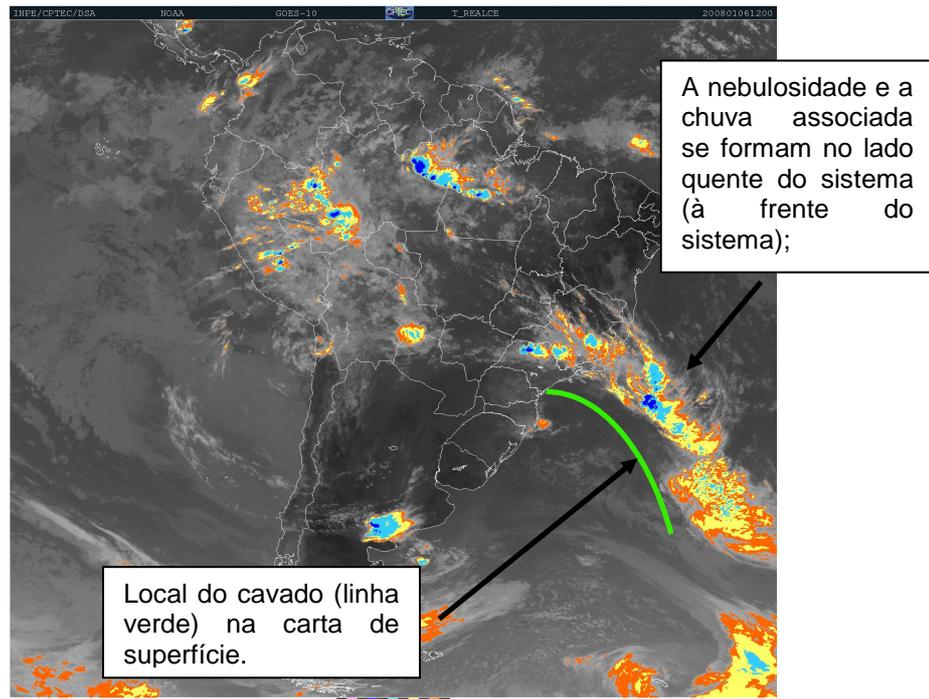


Figura 12 – Imagem do satélite GOES-10 T realçada. Fonte: Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (INPE-CPTEC-DAS).

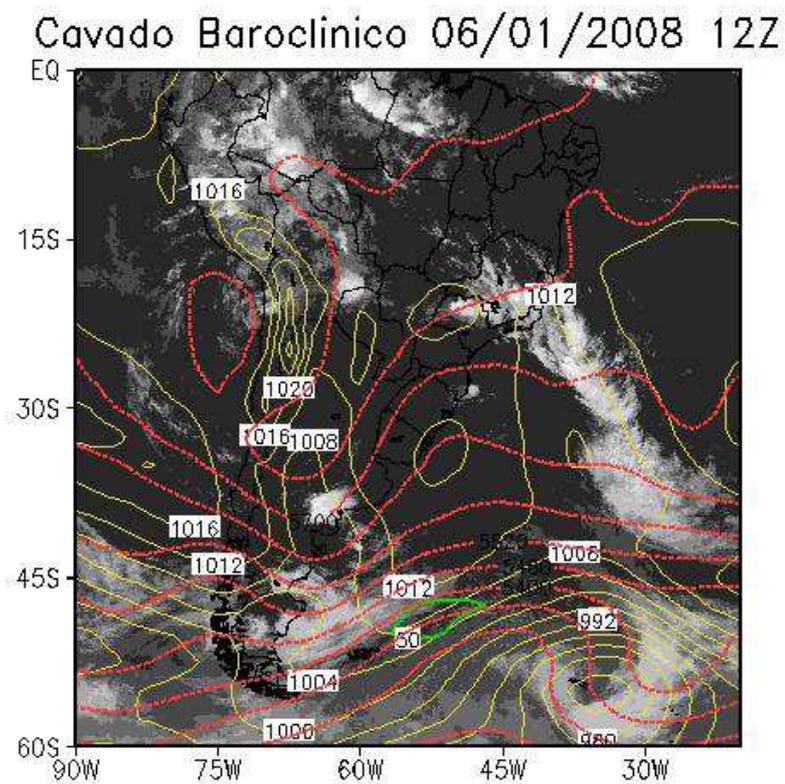


Figura 13 – Imagem de satélite no canal infravermelho indicando a ocorrência de nebulosidade (escala de cinza), linhas de pressão ao nível médio do mar (hPa, linhas em amarelo), região dos jatos, no nível de 250 hPa (linhas em verde) com a magnitude dos ventos zonal e meridional entre 50 e 100 m/s e a espessura da camada 500/1000 hPa (linhas vermelhas).

2.4 CLIMATOLOGIA DE FRENTES FRIAS NA AMÉRICA DO SUL

Segundo Kousky (1979), a maior ocorrência de sistemas frontais que passam no sul da Bahia ocorre no inverno e na primavera. Em anos com maior frequência desses sistemas também há aumento da precipitação na região. Diferente das demais regiões, no sul do país, existe menor variabilidade sazonal quanto à passagem de frentes frias, o número de sistemas frontais é similar entre as diferentes estações do ano (Rodrigues et al., 2004).

Em 2002 foi mostrado por Justi da Silva e Silva Dias que existe uma região frontogenética na América do Sul sobre o continente entre 15° e 40°S. Essa região foi determinada pelos autores com base em pontos de grade (10-60°S e 30-90°W) e com dados de reanálise do NCEP no período de 1981 a 1999. Para a detecção do sistema frontal foi definido que uma frente fria ocorre quando há reversão no sinal da componente meridional do vento de negativo para positivo.

Dametto e Rocha (2006) determinaram uma climatologia de sistemas frontais para a cidade de São Paulo, usando o critério do giro do vento meridional de norte pra sul, com permanência no quadrante sul por pelo menos um dia, além da queda de temperatura entre o dia do giro e mais dois dias após o giro do vento, e assim mostraram que a estação com maior ocorrência de frentes frias foi no inverno, passando 226 sistemas frontais no período entre 1981 e 2002.

Já em 2007, Andrade também determinou uma climatologia de sistemas frontais na América do Sul, porém utilizou um critério de identificação distinto do usado por Justi e Silva Dias (2002), baseando-se na queda de temperatura em 925 hPa, aumento da PNMM (pressão ao nível médio do mar), além da mudança no sinal da componente meridional do vento em 925 hPa de um dia para o outro. Na costa leste da Argentina passam mais frentes frias no período de inverno, diferenciando das regiões Sul e Sudeste do Brasil, onde o maior número de passagem de sistemas frontais ocorre na primavera (Andrade, 2007). Tal estudo concorda com a climatologia definida por Cavalcanti e Kousky (2009), porém discorda sobre a região nordeste de Minas Gerais, sul da Bahia e norte do Espírito Santo, onde a maior ocorrência de frentes frias se dá no inverno. Estudos mais recentes foram realizados para o sul de Minas Gerais. Nessa região, as frentes frias ocorrem mais frequentemente entre o inverno e a primavera (PENNA, 2013; SILVA et al., 2014).

Cardoso et al. (2014) realizaram um estudo relacionando à passagem de frentes frias com o Modo Anular Sul (MAS), que é o principal modo de variabilidade da circulação extratropical no Hemisfério Sul (THOMPSON e WALLACE, 2000). Cardoso et al. (2014) notaram que o número médio anual de sistemas frontais diminui para as menores latitudes, sendo coerente com Andrade (2007) e Cavalcanti e Kousky (2009). Com relação à variabilidade sazonal, tiveram que em Rio Gallegos (51°37'21"S/ 69°13'27"W) praticamente não teve variação no número de sistemas entre as estações do ano, que em Bahia Blanca (38°43'52"S/ 62°16'20"W) e Buenos Aires (34°36'47"S/ 58°22'38"W) a maior ocorrência de frentes frias se dá no verão e outono. Já nas cidades brasileiras compreendidas no estudo, o inverno foi à estação com maior passagem de sistemas frontais. Relacionando a passagem de frentes frias com as fases do Modo Anular Sul em termos gerais, foi mostrado que existe uma pequena preferência na ocorrência de sistemas frontais na fase positiva do MAS em Rio Gallegos, Florianópolis, Paranaguá, São Paulo e Maria da Fé, e na fase negativa em Bahia Blanca, Buenos Aires e Porto Alegre. Já com relação à sazonalidade, todas as cidades analisadas no verão, mostraram que as frentes frias ocorrem preferencialmente na fase positiva do MAS.

Jesus et al. (2016) investigaram como os modelos climáticos regionais da Rede de Modelagem e Observação Oceanográfica (REMO) e o Sistema Regional do Modelo de Clima (RegCM4) simulam a frequência de frentes frias sobre o sul do Brasil, além das contribuições desses sistemas na precipitação sazonal na parte sul da Bacia do Prata na América do Sul. A identificação de sistemas frontais foi realizada de forma objetiva considerando o giro da componente meridional do vento de norte a sul e uma diminuição da temperatura do ar entre um dia antes e um dia depois da passagem da frente fria. Nas simulações realizadas foi possível encontrar uma associação entre a tendência sazonal da precipitação e a tendência de precipitação durante os períodos de passagem de frentes frias, sendo este período definido como dois dias antes para dois dias após a passagem do sistema. No verão, o RegCM4 apresentou maior viés do que o REMO para chuvas tanto para os períodos de frente fria quanto para a climatologia sazonal geral. Já no inverno, as composições de sistemas frontais indicam que uma baixa pressão mais profunda e uma maior disponibilidade de umidade níveis baixos contribuem para a pequena subestimação das chuvas em REMO (-5%) em comparação com o RegCM4 (-25%).

Barbosa (2016) elaborou uma climatologia das frentes frias na costa leste da América do Sul através de uma análise visual de cartas sinóticas da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) da Marina do Brasil e do Centro de Previsão de Tempo e Clima (CPTEC). O período de estudo foi de 2005 a 2013 e abrangeu 11 cidades da costa leste da AS, na qual, para a cidade de Rio Gallegos, foram utilizados dados do Global Forecast System (GFS) a fim de verificar o comportamento das variáveis atmosféricas nas ocorrências das frentes frias. Como resultado, Barbosa mostrou que o número médio anual de frentes frias diminui conforme avança para as menores latitudes, e que praticamente não há variabilidade sazonal no número de frentes frias na porção mais ao sul da América do Sul. No entanto, concluiu que a ocorrência de frentes frias nas cartas sinóticas do CPTEC é menor quando comparadas as cartas da Marina do Brasil, a qual essa menor ocorrência pode estar associada à subjetividade na identificação dos sistemas frontais usada nas cartas sinóticas.

Seluchi et al. (2017) analisaram as principais características das frentes frias que causam chuvas intensas no litoral de Santa Catarina, a fim de melhorar o conhecimento e a previsão desse tipo de sistema. Para isso, fizeram uma climatologia dos sistemas frontais, utilizando reanálises CFSR do NCEP e dados de precipitação do CPTEC/INPE no período de 1998 a 2010. Os autores observaram que durante todo o período de estudo, a frequência de frentes frias chuvosas e não chuvosas mostrou-se bastante variável. Com relação à precipitação dos dias que antecedem a passagem dos sistemas frontais, verifica-se que com dois dias antes, os maiores acumulados de chuva se concentram sobre a Bacia do Prata, com maior intensidade sobre o Rio Grande do Sul e o oeste de Santa Catarina, porém, não mostram uma distribuição espacial alongada, o que é típico deste sistema sinótico. Ao analisar as diferenças sazonais, notaram que no semestre frio as chuvas se estendem menos sobre o interior do continente e mais sobre o oceano Atlântico adjacente, e no semestre quente a chuva se concentra claramente desde a Amazônia até o oceano Atlântico. Por fim, Seluchi et al. (2017) concluíram que as frentes frias que causam os maiores acumulados de chuva podem ocorrer ao longo de todo o ano e apresentam forte variabilidade interanual.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Identificação dos Sistemas

Foram identificados os sistemas frontais polares, subtropicais e cavados baroclínicos que passaram em oito cidades (Figura 14) entre a região Sul e o Nordeste do Brasil (Tabela 1) no período de 2010 a 2016, com base nas cartas sinóticas de altitude (250 hPa), níveis médios (500 hPa), baixos níveis (850 hPa) e superfície obtidas do Grupo de Previsão de Tempo INPE-CPTEC-GPT (<http://gpt.cptec.inpe.br/>), e também através das imagens dos satélites GOES-10, GOES-12 e GOES-13 do canal temperatura de brilho das nuvens realçadas, obtidas pela Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais INPE-CPTEC-DSA (<http://satelite.cptec.inpe.br/>).

Para identificar os três tipos de sistemas, foram utilizadas as definições apresentadas na seção 2, onde:

Frente polar clássica

Basicamente uma frente fria polar “clássica” apresenta forte gradiente de espessura da camada 500/1000 hPa, quebração nas isóbaras, jato polar em 250 hPa e nebulosidade e chuva atrás do sistema. De forma detalhada:

- A frente fria localiza-se depois de um acentuado gradiente de temperatura e/ou espessura 500/1000 hPa e de temperatura de ponto de orvalho;
- Há a presença bem definida do jato polar norte em 250 hPa, no qual está associado à frente em superfície;
- Existe um acentuado gradiente de pressão com isóbaras quebradas, significando uma circulação ciclônica do vento;
- Pode ocorrer o aparecimento do jato subtropical acoplado ao jato polar norte;

- A nebulosidade e precipitação ocorrem em uma pequena área localizada no lado frio (atrás do sistema);
- Ocorrem mais frequentemente nos meses de junho, julho e agosto.

Frente Subtropical

Uma frente subtropical apresenta principalmente fraco gradiente de espessura da camada, não há presença marcante da quebradura das isóbaras, não há gradiente de ponto de orvalho, não há jato polar, mas pode aparecer o subtropical e nebulosidade e chuva atrás do sistema. De forma detalhada:

- Existe um fraco gradiente de temperatura e/ou espessura, significando uma fraca baroclinia;
- Observa-se circulação ciclônica do vento e presença de fraco gradiente de pressão e isóbaras normalmente sem quebraduras;
- A nebulosidade e precipitação associada ocorrem em uma grande área localizada principalmente atrás do sistema, similar à frente polar clássica;
- O gradiente de temperatura do ponto de orvalho praticamente não existe, devido a esses sistemas serem principalmente oceânicos;
- Não existe a presença de um jato polar associado diretamente, porém, quase sempre aparece o jato subtropical;
- Ocorrem mais nos meses de Agosto, Setembro, Outubro e Novembro.

Cavado Baroclínico

Um cavado baroclínico apresenta principalmente as mesmas características de uma frente subtropical, com exceção da nebulosidade e chuva que se

apresentam à frente do sistema, além de um significativo gradiente de umidade. De forma detalhada:

- Existe um fraco gradiente de temperatura;
- Apresentam um significativo gradiente de umidade (água precipitável, temperatura do ponto de orvalho, umidade específica, entre outros);
- A banda de nebulosidade e a chuva associada se formam no lado quente do sistema (à frente do sistema);
- Em muitas oportunidades organizam episódios de ZCAS (Zona de Convergência do Atlântico Sul) ou de ZCOU (Zona de Convergência de Umidade);
- Geralmente representam ramos frios fracos de ciclones extratropicais também fracos;
- Não possuem jato polar associado, porém sempre têm associado o jato subtropical;
- Ocorrem mais na estação chuvosa do Brasil, de Outubro a Abril.

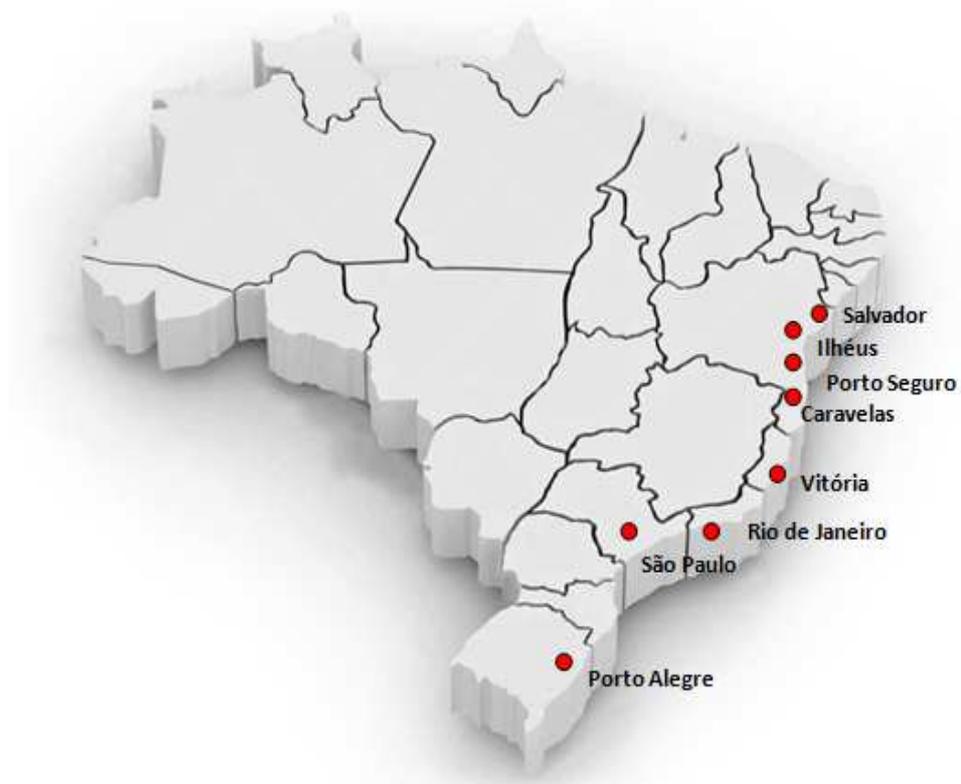


Figura 14 – Mapa do Brasil com as cidades em estudo.

Porto Alegre/RS:	30° 01' 59" S / 51° 13' 48" W /	Altitude: 3m
São Paulo/SP:	23°32'50" S / 46°38'09" O /	Altitude: 769 m
Rio de Janeiro/RJ:	22° 53' 00" S / 43° 06' 13" W /	Altitude: 5m
Vitória/ES:	20° 19' 10" S / 40° 20' 16" W /	Altitude: 3m
Caravelas/BA:	17° 43' 55" S / 39° 15' 57" W /	Altitude: 10m
Porto Seguro/BA:	16° 26' 59" S / 39° 03' 53" W /	Altitude: 49m
Ilhéus/BA:	14° 47' 20" S / 39° 02' 58" W /	Altitude: 52m
Salvador/BA:	12° 58' 16" S / 8° 30' 39" W /	Altitude: 8m

Tabela 1 – Latitude, longitude e altitude das cidades em estudo.

A identificação dos sistemas foi realizada visualmente, observando as cartas sinóticas elaboradas pelo GPT-CPTEC-INPE (mas desconsiderando as marcações/análises realizadas pelos meteorologistas) e imagens dos satélites nos horários das 00 Z, 06 Z, 12 Z e 18 Z. Para organizar os resultados foram elaborados diagramas para acompanhar o deslocamento das frentes e cavados. A Figura 15 mostra um exemplo de diagrama elaborado para o mês de agosto de 2011, onde os demais diagramas são mostrados no anexo deste trabalho. No eixo x foram indicadas as horas 00 Z e 12 Z de cada dia do mês e no eixo y, colocadas por ordem

de latitude, as oito cidades em estudo. Nos diagramas foram marcadas apenas as ocorrências às 00 Z e 12 Z, a fim de minimizar o tamanho do diagrama para melhor visualização. As ocorrências das 06 Z foram marcadas como ocorridas às 12 Z e ocorrências das 18 Z marcadas como ocorridas às 00 Z do dia seguinte, pois a passagem do sistema entre o intervalo das 00 Z e 12 Z, e vice-versa, também seria registrado como ocorrido, por exemplo, uma frente fria que passou por Porto Alegre/RS às 06 Z está entre o intervalo, no entanto, quando alcançou a região o período das 00 Z já tinha passado, mas o período das 12 Z não, então a passagem desse sistema frontal às 06 Z foi marcada como ocorrida as 12 Z. Os diagramas foram feitos mês a mês, de 2010 a 2016. No diagrama os diferentes sistemas foram marcados com cores distintas para melhor visualização, sendo as frentes frias polares marcadas em preto, as frentes subtropicais em vermelho e os cavados baroclínicos em azul. É importante ressaltar que uma frente subtropical pode ser classificada em dois tipos, um no qual o sistema evolui de uma frente polar clássica para uma frente subtropical conforme vai avançando para menores latitudes e perdendo seu contraste térmico, e outro na qual já se forma em latitudes mais baixas próximas ao sudeste brasileiro. No caso em que a frente subtropical é formada após a perda do contraste térmico da frente fria clássica, no diagrama o sistema começa marcado em preto e passa para vermelho conforme a mudança nas características entre as duas frentes.

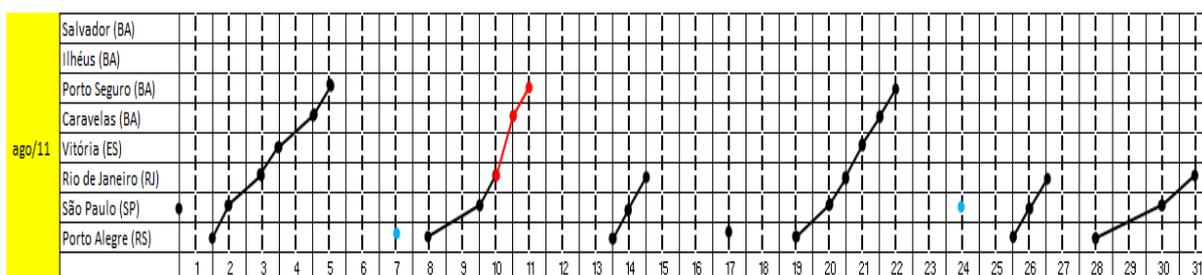


Figura 15 – Diagrama elaborado para o mês de agosto de 2011, mostrando o deslocamento dos sistemas passando pelas cidades em estudo colocadas por ordem de latitude. Os sistemas representados pela linha e pontos pretos caracterizam frentes frias polares clássicas; os sistemas em linha e pontos vermelhos são frentes subtropicais; e os sistemas em ponto azul são cavados baroclínicos.

3.2 Estatísticas

A etapa seguinte consistiu em computar algumas estatísticas: número total de cada tipo de sistema por cidade desde 2010 a 2016, média total de cada tipo de sistema que passava em cada cidade, média mensal de cada tipo de sistema, média sazonal de cada tipo de sistema, total de cada tipo de sistema no Sudeste, separado em estação chuvosa (de outubro a abril) e em estação seca (de maio a setembro), total de precipitação anual causada por cada tipo de sistema.

3.3 Precipitação

Para identificar o total de precipitação anual causada por cada tipo de sistema na cidade de São Paulo/SP, foi utilizada a técnica empregada por Silva et al. (2014), onde foi considerado que a chuva é decorrente de uma frente fria quando ocorrer no período entre um dia antes, chamada chuva pré-frontal, e um dia após a passagem da frente fria, chamada chuva pós-frontal. No presente estudo, tal estatística não foi utilizada apenas para as frentes frias polares, mas também para frentes subtropicais e cavados baroclínicos. Os dados utilizados foram os diagramas de identificação da passagem de cada tipo de sistema na cidade de São Paul/SP, e dados de precipitação em mm disponibilizados pela Somar Meteorologia, sendo dados de SYNOP do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

4. RESULTADOS

4.1 Frequência anual de sistemas frontais e cavados baroclínicos por cidade

As oito cidades brasileiras em estudo são mostradas nas Figuras 16 juntamente com a quantidade de sistemas que ocorreram no período de 2010 a 2016. Há maior ocorrência de frentes frias polares no sul do país, maior ocorrência de frentes subtropicais na região Sudeste, e uma maior ocorrência de cavados baroclínicos entre o sul e o sudeste brasileiro. A figura 16 mostra maior ocorrência de frentes polares no sul do Brasil (Porto Alegre/RS) e a diminuição de sistemas conforme aumenta a latitude. A Figura 17 mostra que há maior ocorrência de frentes subtropicais conforme aumenta a latitude. O maior número de frentes subtropicais ocorre entre o Rio de Janeiro/RJ, Vitória/ES e Caravelas/BA e, por fim, na Figura 18 observa-se que há maior passagem de cavados baroclínicos mais no sul e sudeste do país e a mesma vai diminuindo conforme aumenta a latitude.

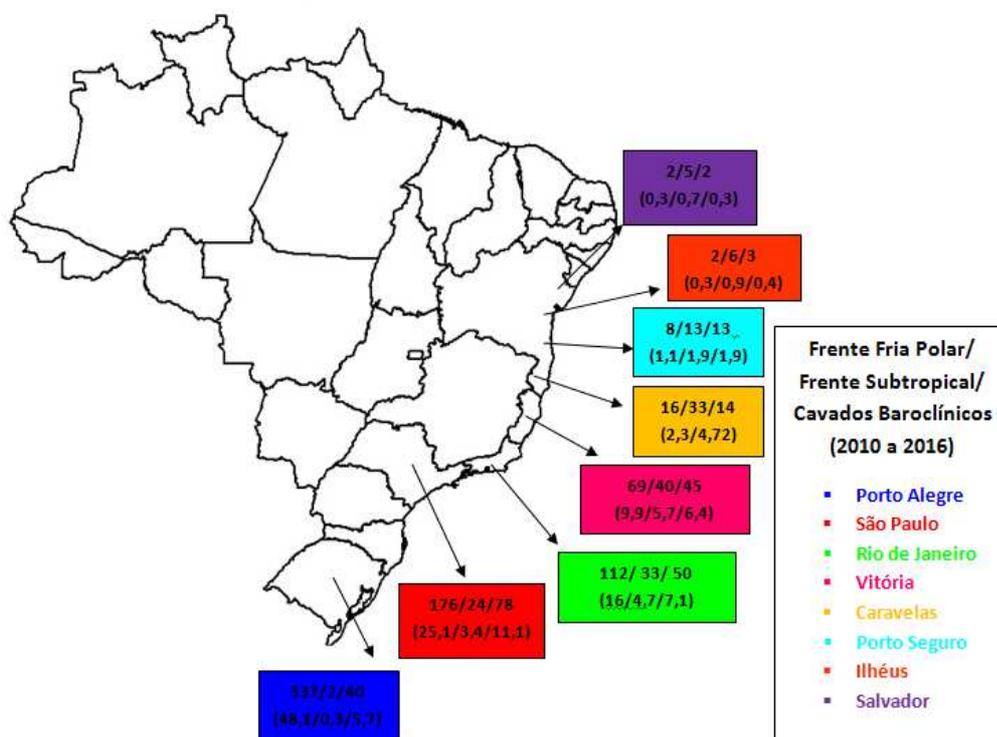


Figura 16 – Número total de frentes frias polares clássicas, frentes subtropicais e cavados baroclínicos desde 2010 a 2016 e média anual (valores entre parênteses), por cidade em estudo.

4.2 Frequência Mensal e Sazonal

Com relação às frentes frias polares clássicas (Figura 17), foi identificado que não há variabilidade significativa entre as estações do ano em Porto Alegre/RS, já que os sistemas ocorreram de forma bem distribuída durante todo o ano, o que concorda com os estudos feitos por Rodrigues et. al (2004). Em São Paulo/SP, o maior número de frentes frias polares ocorreu na estação de inverno (JJA), concordando com Dametto e Rocha (2006), onde tal comportamento sazonal ocorreu também na cidade do Rio de Janeiro. Em Vitória/ES, o maior número de passagem de frentes frias ocorreu entre os meses de maio e setembro, abrangendo o período de inverno definido por Cavalcanti e Kousky (2009) como sendo a estação do ano preferencial de ocorrência desses sistemas na região. Para as cidades baianas, o maior número de sistemas frontais clássicos ocorreu nos meses de inverno (JJA) e início da primavera (setembro), o que foi mostrado por Kousky (1979) como estações do ano preferenciais para ocorrência desses sistemas.

A Figura 17 também mostra a distribuição média das frentes subtropicais ocorridas durante o período de estudo. O maior número de frentes subtropicais ocorreu em Vitória/ES e Caravelas/BA na primavera (SON). Em São Paulo/SP, ocorreram frentes subtropicais com maior frequência no final do outono (maio), nos meses de setembro e novembro, caracterizando o início e o fim da primavera. No Rio de Janeiro/RJ, o maior número de frentes subtropicais registrado foi entre os meses de maio e junho, agosto e outubro. Nas cidades baianas, Porto Seguro, Ilhéus e Salvador, o maior número de sistemas ocorreu em meados da primavera (outubro).

Por fim, a Figura 17 mostra a distribuição de cavados baroclínicos que ocorreram desde 2010 a 2016. Em Porto Alegre/RS, o maior número de cavados ocorreu em agosto, tendo em média a passagem de um sistema a cada ano de estudo. Em São Paulo/SP, o maior número de cavados baroclínicos ocorreu no final da primavera (novembro). As demais cidades em estudo ficaram com uma distribuição sazonal bastante similar, tendo os picos de maior ocorrência no mês de março e no mês de novembro.

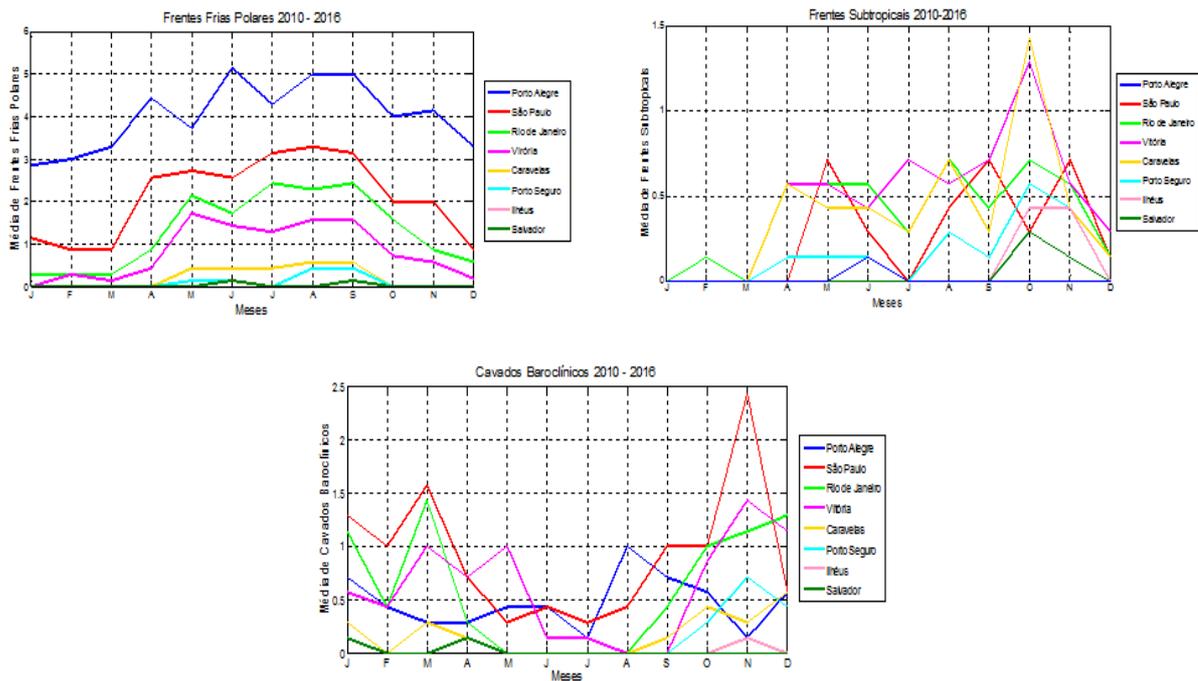


Figura 17 – Distribuição do número total médio de frentes frias polares, frentes subtropicais e cavados baroclínicos desde 2010 a 2016, mostrando a quantidade de registros mensais (somando todas as ocorrências de todos os janeiros, todos os fevereiros e assim por diante).

Como mostrado no item 3.1 de identificação dos sistemas, a estação preferencial de ocorrência de frentes frias polares clássicas se dá no inverno, o que foi mostrado também por Kousky em 1979 e por Dametto e Rocha em 2006, exceto para Porto Alegre/RS que não tem variação sazonal marcante, pois em média, o número de passagem de sistemas pela região é praticamente constante a cada ano (Figura 18). Como justificativa da maior ocorrência de frentes frias polares no inverno tem-se a oscilação do jato polar, que no inverno localiza-se mais ao norte. Já com relação às frentes subtropicais, a maior ocorrência destes sistemas se dá nos meses de agosto, setembro, outubro e novembro, como também foi estabelecido no item 3.1 do presente estudo. Por último, a estação do ano preferencial para ocorrência de cavados baroclínicos se dá na estação chuvosa do Brasil, onde o número médio de passagem destes sistemas aumenta a partir de outubro e diminui após o mês de abril. É importante ressaltar que as frentes frias polares clássicas, frentes subtropicais e cavados baroclínicos podem ocorrer em qualquer estação do ano, porém, devido às condições do tempo que influenciam na formação dos sistemas

frontais e cavados, existe maior ocorrência entre uma estação e outra, caracterizando assim uma variação sazonal dos sistemas.

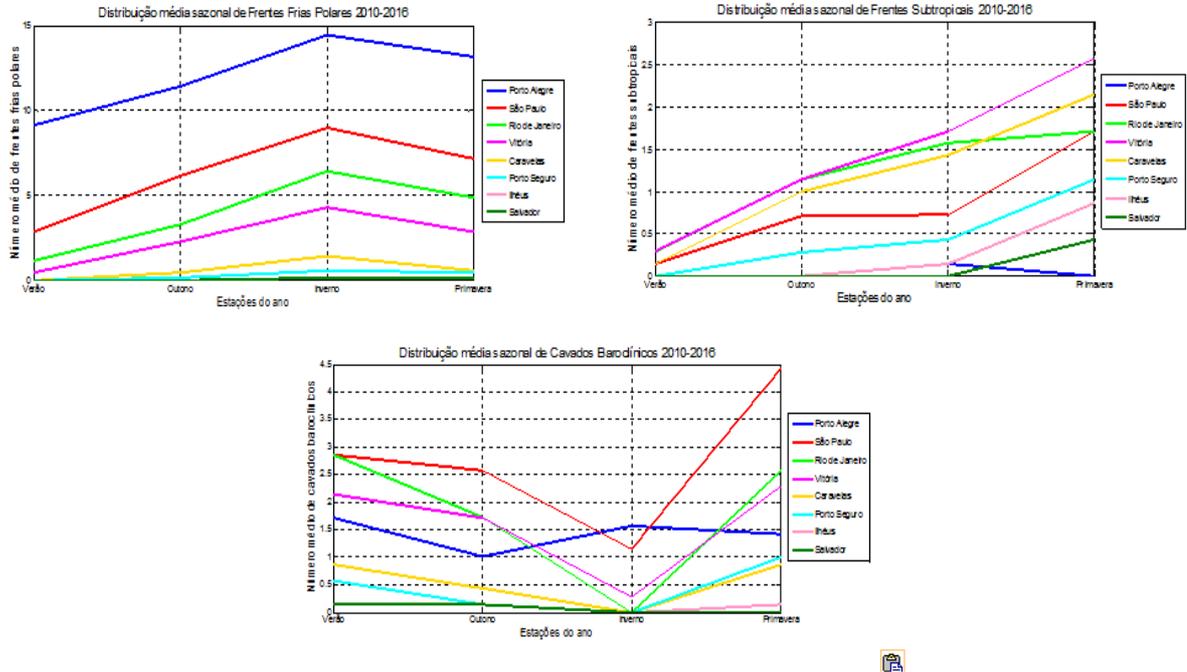


Figura 18 – Distribuição média sazonal de frentes frias polares, frentes subtropicais e cavados baroclínicos desde 2010 a 2016.

4.3 Sistemas durante a estação seca e chuvosa no sudeste do Brasil

Para um melhor entendimento do comportamento de cada tipo de sistema em análise, as frentes frias polares, frentes subtropicais e cavados baroclínicos foram divididos entre ocorrências na estação chuvosa do ano (de outubro a abril) e ocorrências na estação seca do ano (de maio a setembro). Porém, essa análise foi feita apenas para regiões do Sudeste, aplicando-se em São Paulo/SP, Rio de Janeiro/RJ e Vitória/ES, pois as demais cidades em estudo não sofrem variação significativa entre a estação seca e estação chuvosa.

A Figura 19 mostra a comparação entre a quantidade de frentes frias polares que ocorreu na estação chuvosa e na estação seca. O maior número de passagem de sistemas frontais clássicos ocorreu na estação seca para todas as três cidades do Sudeste em estudo, sendo 104 em São Paulo, 77 no Rio de Janeiro e 53 em Vitória.

A Figura 19 também mostra a comparação entre a quantidade de frentes subtropicais que ocorreu na estação chuvosa e estação seca no Brasil durante os sete anos em estudo. O maior número de passagem de sistemas subtropicais ocorreu, assim como para os sistemas clássicos, na estação seca, porém em quantidades menores, sendo 15 em São Paulo, 18 no Rio de Janeiro e 21 em Vitória.

Por fim, a Figura 19 mostra que diferente dos sistemas frontais, a maior ocorrência de cavados baroclínicos ocorre na estação chuvosa do Brasil, de outubro a abril, concordando com a definição do item 3.1 do presente estudo. Em São Paulo o número de passagem de cavados desde 2010 a 2016 foi de 60 sistemas. No Rio de Janeiro houve a passagem de 47 cavados baroclínicos. E em Vitória, passaram 43 cavados durante os 7 anos.

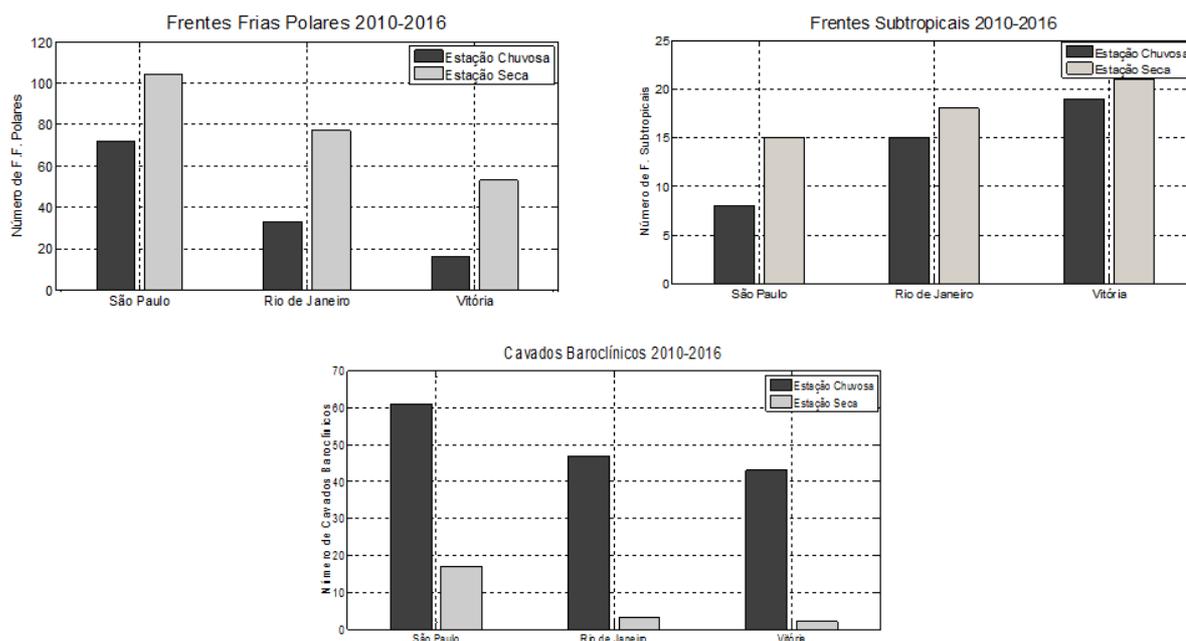


Figura 19 – Comparação entre o número de ocorrências de frentes frias polares, frentes subtropicais e cavados baroclínicos entre a estação chuvosa (de outubro a abril) e estação seca (de maio a setembro) no Brasil.

4.4 Chuva decorrente de um sistema frontal ou cavado baroclínico em São Paulo

A Figura 20 mostra o total de precipitação decorrente dos sistemas frontais e cavados baroclínicos em 2010, onde os maiores volumes de chuva foram relacionados a dias que ocorreram frentes frias polares ou cavados baroclínicos, sendo 366,1 mm para o primeiro tipo sistema e 352,7 mm para o segundo tipo de

sistema. As frentes subtropicais contribuíram, em 2010, apenas em 52,1 mm do total de precipitação anual. Mostra que o maior volume de chuva acumulado durante 2011 em São Paulo ocorreu com a passagem de cavados baroclínicos, chegando a 290,0 mm, seguido de 109,2 mm devido a frentes frias polares e 25,2 mm devido à passagem de frentes subtropicais. Já em 2012, a quantidade total de chuva registrada durante o ano foi de 431,7 mm devido à passagem de sistemas frontais clássicos, decaindo para 110,9 mm relacionados aos cavados baroclínicos, e apenas 44,9 mm devido às frentes subtropicais. Em 2013, os maiores volumes de chuva também foram relacionados à passagem de sistemas frontais clássicos, sendo registrados 355,3 mm, sendo mais que o dobro do total acumulado devido à passagem de cavados baroclínicos (159,5 mm), assim como muito maior que o total relacionado às frentes subtropicais (55,2 mm). Em 2014, o total de chuva acumulado é maior devido à ocorrência de frentes frias polares, chegando aos 473,4 mm, sendo superior ao registro de chuva por cavados baroclínicos (270,6 mm). Mostra que em 2015, os maiores volumes de chuva foram bastante parecidos tanto para chuvas relacionadas às frentes frias quanto aos cavados baroclínicos, sendo 513,6 mm para o primeiro tipo de sistema e 485,2 mm para o segundo. Por fim, a Figura 20 mostra a distribuição de chuva no ano de 2016, sendo os maiores valores acumulados devido à passagem de cavados baroclínicos (390,1 mm), seguido por 262 mm devido às frentes frias polares e 102,9 mm devido às frentes subtropicais.

A Figura 21 mostra o total de precipitação acumulado em mm durante todo o período de estudo, desde 2010 a 2016, relacionando cada tipo de sistema frontal ou cavado baroclínico a chuva ocorrida um dia antes (chuva pré-frontal), no dia da passagem do sistema, e um dia após a passagem (chuva pós-frontal). Em destaque são mostrados os percentuais de cada tipo de sistema com relação ao volume de chuva acumulado, mostrando um percentual de 51,8% para chuva devido às frentes frias polares, 5,8% para chuva relacionada à passagem de frentes subtropicais, e 42,5% para casos de cavados baroclínicos.

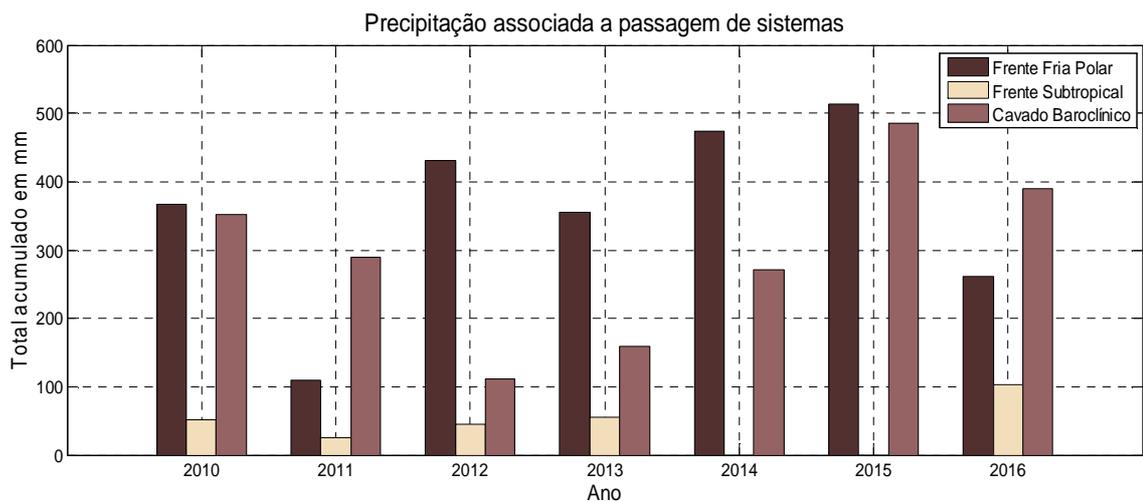


Figura 20 – Total de precipitação em mm na cidade de São Paulo/SP de 2010 a 2016.

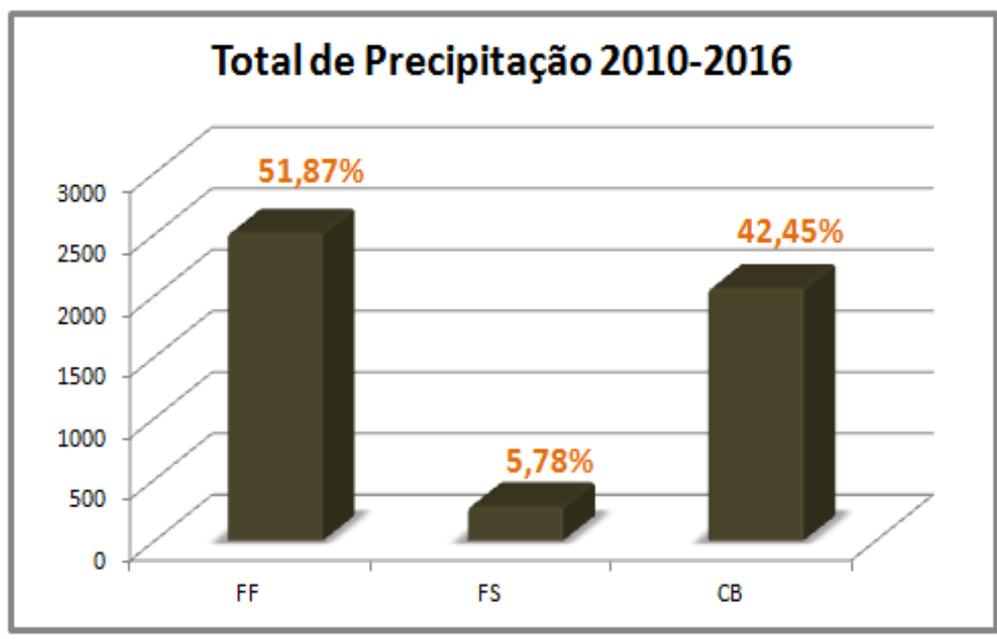


Figura 21 – Total de precipitação em mm durante todo o período de estudo (2010 a 2016), mostrando o percentual de chuva sobre cada sistema frontal ou cavado baroclínico.

5. CONCLUSÃO

Através da análise de oito cidades brasileiras sendo utilizadas as cartas sinóticas do CPTEC/INPE, foi possível acompanhar o deslocamento de sistemas frontais e cavados baroclínicos, conforme os meses do ano. Ao acompanhar o deslocamento dos sistemas foi possível determinar as regiões do Brasil com maior ocorrência de frentes frias polares, frentes subtropicais e cavados baroclínicos. Na região sul do país há maior frequência de frentes frias polares clássicas, e na região Sudeste, é mais frequente a ocorrência de frentes subtropicais. No entanto, os cavados baroclínicos se distribuem entre o sul e o sudeste brasileiro.

Analisando a variação sazonal dos sistemas, durante o período de sete anos de estudo foi possível estabelecer que a estação preferencial para ocorrência de frentes frias polares se dá no inverno, que as frentes subtropicais ocorrem com maior frequência nos meses de agosto, setembro, outubro e novembro, e que a maior frequência de cavados baroclínicos ocorre entre outubro e abril.

Já com relação à distribuição dos sistemas frontais e cavados baroclínicos entre a estação chuvosa (de outubro a abril) e estação seca (de maio a setembro) no Brasil, foi estabelecido através dos sete anos de acompanhamento do deslocamento dos sistemas, que a estação preferencial para ocorrência de frentes frias polares e frentes subtropicais se dá entre os meses de maio e setembro, e que nos demais meses do ano ocorrem mais cavados baroclínicos. É importante ressaltar que tal análise foi feita considerando somente São Paulo/SP, Rio de Janeiro/RJ e Vitória/ES, pois para as outras cidades em estudo não foi identificada uma variação na frequência entre uma estação do ano e outra.

Como sugestão para trabalhos futuros, fazer a análise da chuva relacionada aos sistemas para as demais cidades, como foi feito para São Paulo, mostrando a chuva um dia antes, no dia da passagem do sistema e um dia após, pois assim será possível compreender os efeitos destes sistemas no tempo nas demais cidades, sendo possível uma análise mais detalhada com relação as chuvas pré frontal e pós frontal, que pode ser implementada nas previsões do tempo.

6. REFERÊNCIAS

ANDRADE, K. **Climatologia e comportamento dos sistemas frontais sobre a América do Sul**. 2007. 187 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2007.

BARBOSA, M. A. **Climatologia de Frentes Frias no Leste da América do Sul: Intercomparação de Dados**. (Monografia de Graduação). Itajubá, 2016.

BJERNES, J. e SOLBERG, H., 1922: **Life cycle of cyclones and the polar front theory of atmospheric circulation**. *Geofys. Publ.*, **3**, 3-18.

CARDOSO, A. B. **Climatologia de frentes frias na América do sul e sua relação com o modo anular sul**. Monografia de Graduação (2014)

CAVALCANTI, I. F. A.; KOUSKY, V. E. **Frentes frias sobre o Brasil**. In: Cavalcanti, I. F. A.; Ferreira, N. J.; Justi da Silva, M. G. A.; Silva Dias, M. A. F. (Eds.) *Tempo e clima no Brasil*. São Paulo, Oficina de Textos. 2009. p.135-148.

CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS (CPTEC) / INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE), disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br/>> Último acesso em: 05 de agosto de 2017.

DAMETTO, G.; DA ROCHA, R. P. **Características Climáticas dos Sistemas Frontais na Cidade de São Paulo**. In: XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2006, Florianópolis. Anais... 2006, 1-5.

EARTH SYSTEM RESEARCH LABORATORY – PHYSICAL SCIENCES DIVISION, disponível em: <<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>> Último acesso em: 10 de agosto de 2017.

JESUS, E. M. **Simulações Climáticas Regionais para o CORDEX sobre a América do Sul e impactos das frentes frias na climatologia simulada.** Universidade de São Paulo. São Paulo, 2014.

KOUSKY, V. E. **Frontal Influences on Northeast Brazil.** Monthly Weather Review, n. 107, pp. 1140-1153, 1979.

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

NATIONAL CENTERS FOR ENVIRONMENTAL INFORMATION (NOAA), disponível em < <https://www.ncdc.noaa.gov/gridsat/index.php?name=data> > Último acesso em: 10 de agosto de 2017.

PAEGLE, J., 1987: **Interactions between convective and large-scale motions over Amazonia. Geophysiology of Amazonia: Vegetation and Climate Interactions**, R. Dickinson, Ed., Willy, 347-390.

PENNA, A. C. **Avaliação da Passagem de Frentes Frias na Região Sul de Minas Gerais com base em Cartas Sinóticas e Método Objetivo.** 2013.51 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Itajubá, 2013.

REBOITA, M. S.; KRUSCHE, N.; AMBRIZZI, T.; ROCHA, R. P. **Entendendo o Tempo e o Clima na América do Sul.** Revista Terra e Didática 8(1):34-50, 2012.

RODRIGUES, M. L. G.; FRANCO, D.; SUGAHARA, S. **Climatologia de Frentes Frias no Litoral de Santa Catarina.** Revista Brasileira de Geofísica, v.22, n. 2, p.135-151, 2004.

SANDERS, F., 2005: **Real front or baroclinic trough?. *Weather and Forecasting*, 20, 647-651.**

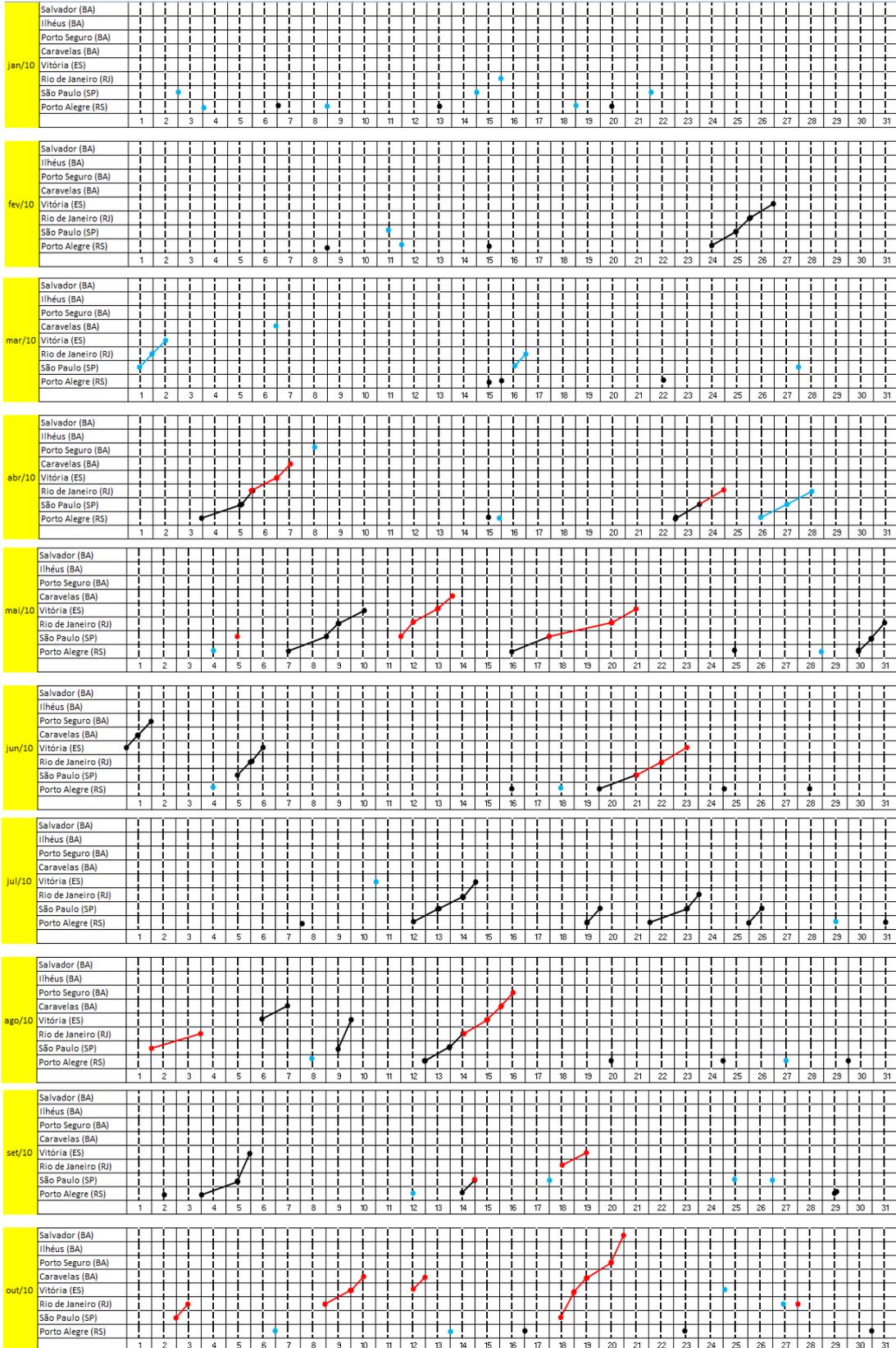
SELUCHI, M.; BEU, C.; ANDRADE, K. M. **Características das Frentes Frias Causadores de Chuvas Intensas no Leste de Santa Catarina.** Revista Brasileira de Meteorologia, v.32, n. 1, 25-37, 2017.

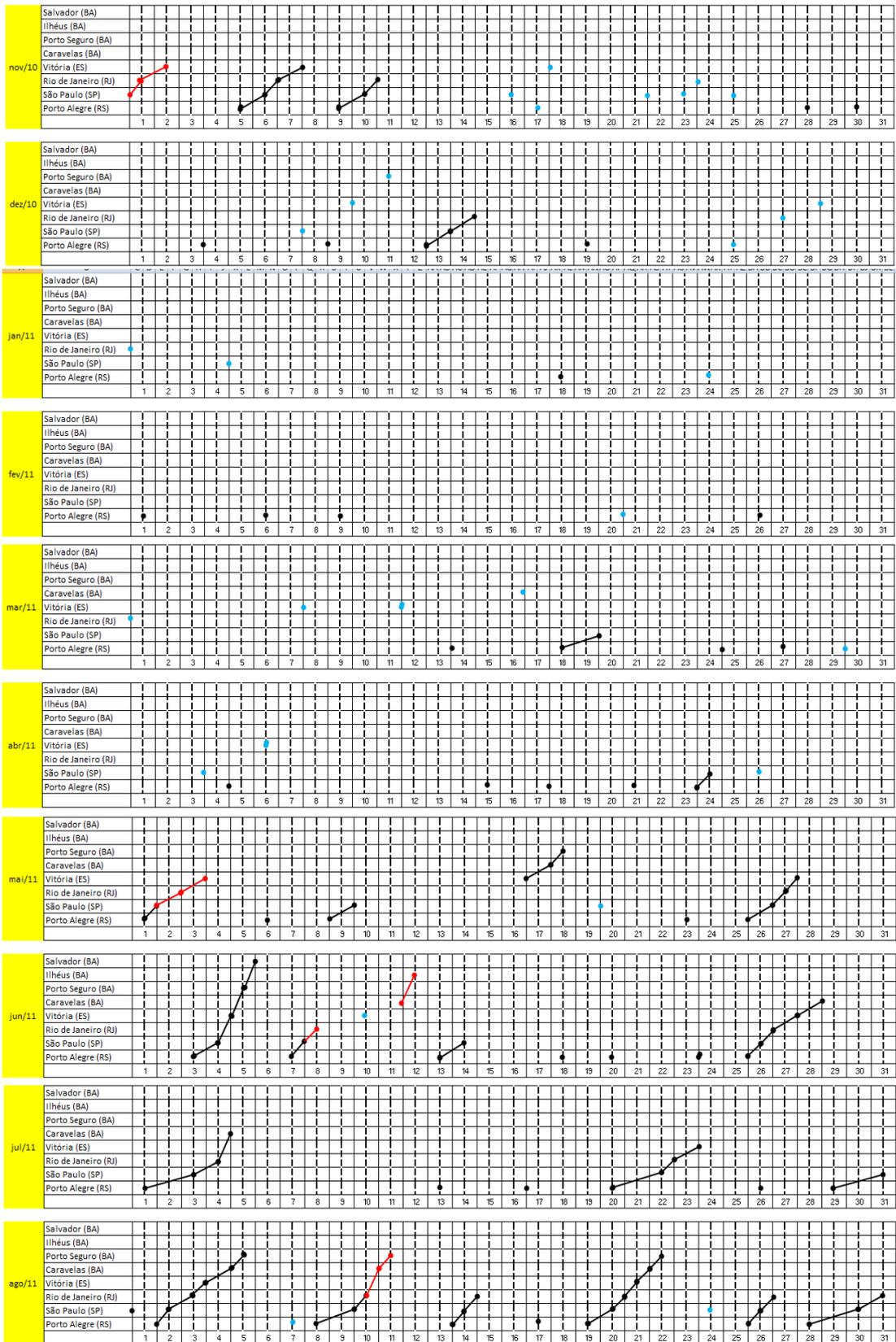
SCHULTZ, D. M.; 2006: **Perspectives on Fred Sanders's research on cold fronts.** The Fred Sanders Symposium, Volume 2. Amer. Meteor. Soc.

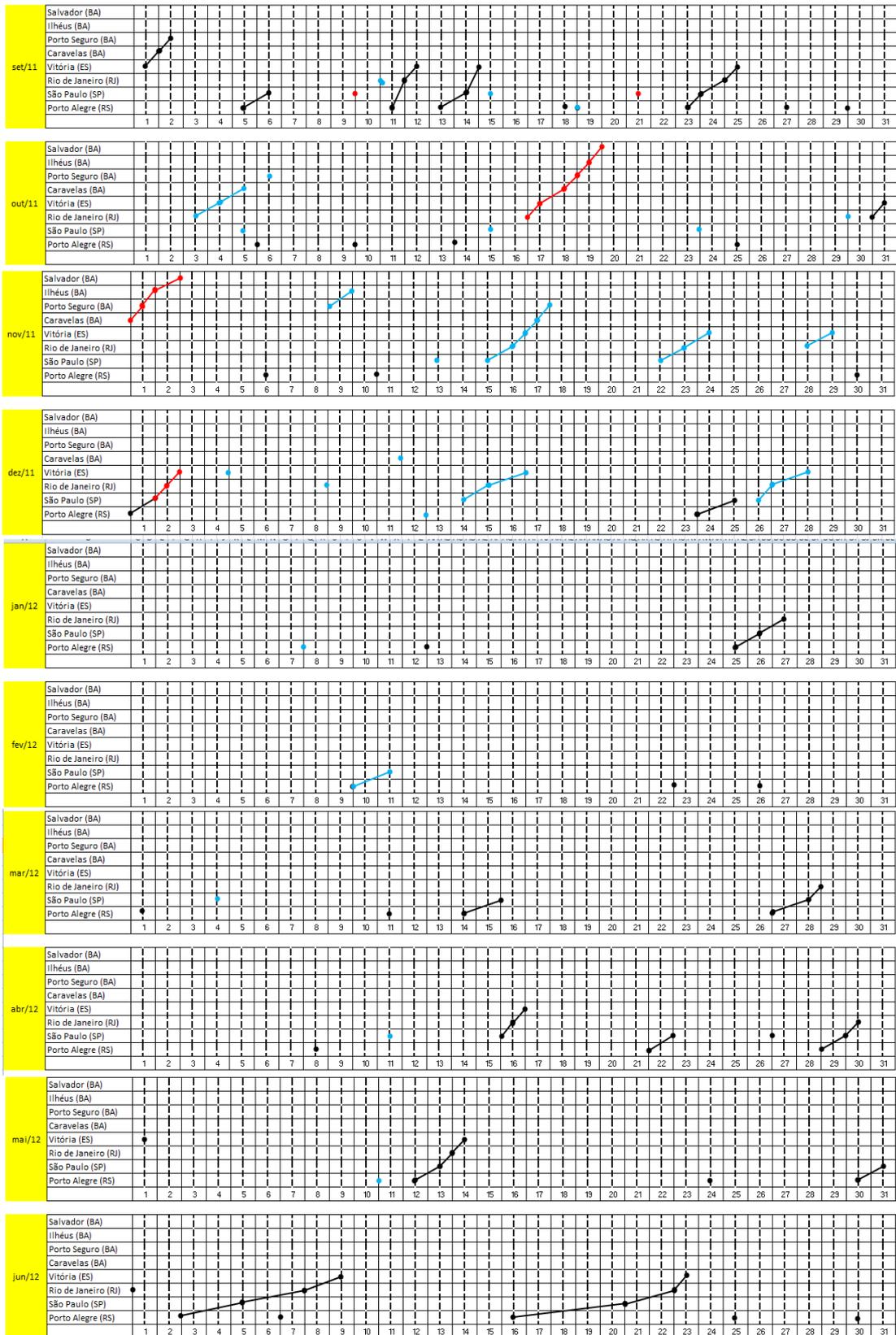
SILVA, L. J; REBOITA, M. S; ROCHA, R. P. **Relação da Passagem de Frentes Frias na Região Sul de Minas Gerais (RSMG) com a Precipitação e Eventos de Geadas.** Revista Brasileira de Climatologia, v.14, n. 10, p.232-235, 2014.

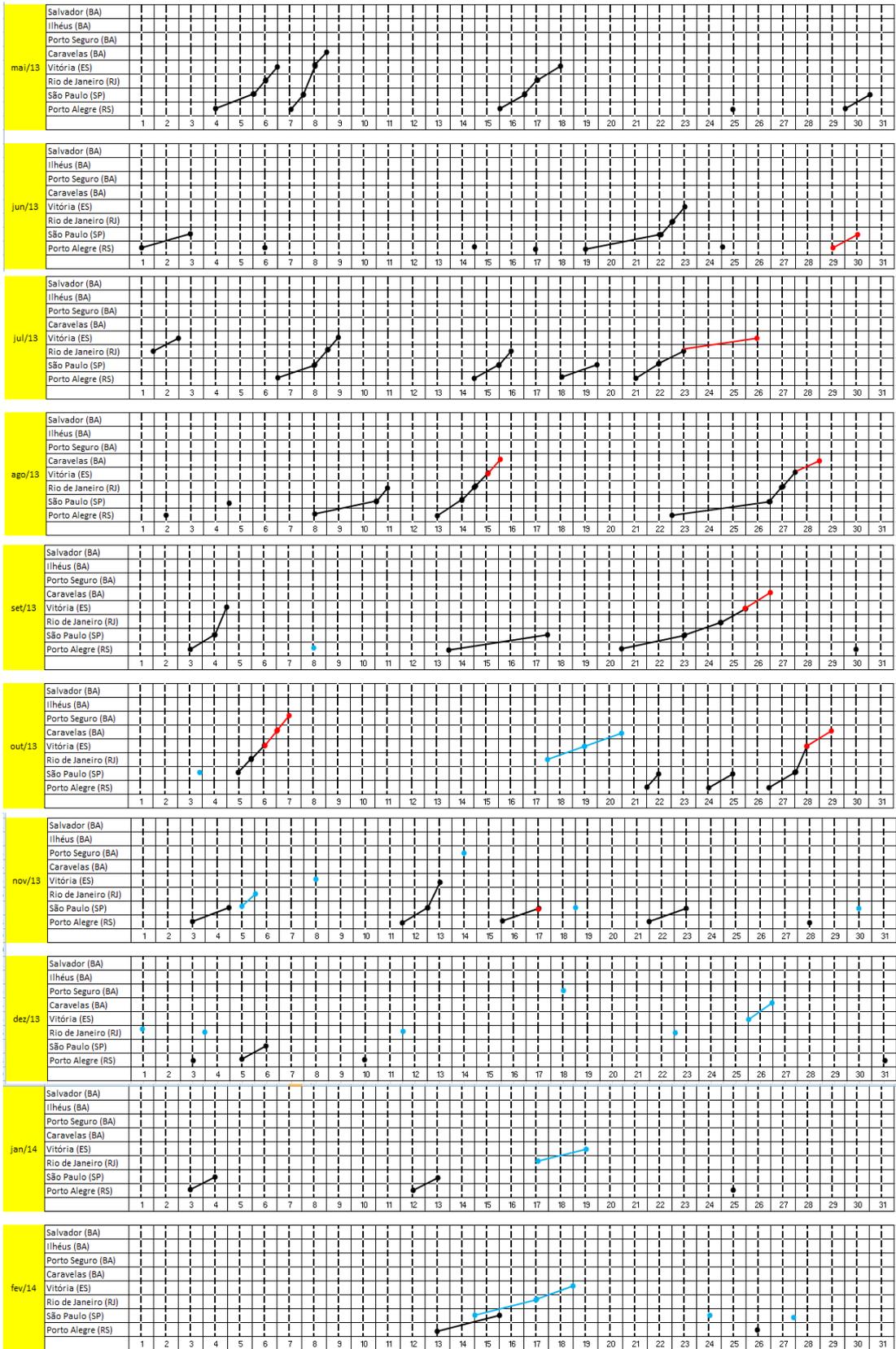
THOMPSON, D. W. J.; WALLACE, J. **Annular modes in the extratropical circulation.** Part i: Month-to-month variability*. Journal of Climate, 13(5), 2000.

ANEXOS









Relação das Chuvas e passagem de Sistemas Frontais e Cavados Baroclínicos em São Paulo					
	Data passagem	Chuva 1 dia antes	Chuva no dia	Chuva 1 dia depois	Total chuva (mm)
2010	03/jan	10,2	30,4	0	40,6
	15/jan	0	6,3	0	6,3
	22/jan	44	9,2	1	54,2
	11/jan	0	1	20,6	21,6
	25/jan	2,2	32,2	10,3	44,7
	01/mar	0	32,3	7	39,3
	16/mar	18,9	0,5	0	19,4
	28/mar	5,4	2,2	3	10,6
	05/abr	48	10,8	6,6	65,4
	24/abr	0	21	0	21
	27/abr	0	0	1,9	1,9
	05/mai	0	0	5	5
	09/mai	0	38,7	1,7	40,4
	12/mai	0,2	0	0	0,2
	18/mai	0	0	9	9
	31/mai	0	0	0,4	0,4
	05/jun	0	10,8	0	10,8
	21/jun	0	0	0	0
	13/jul	0	0,2	41,8	42
	20/jul	0	0	0	0
	23/jul	0	0	0	0
	26/jul	0	0	0	0
	02/ago	0	0	0	0
	09/ago	0	0	0	0
	14/ago	0	0	0,6	0,6
	05/set	0	0	0	0
	15/set	0	0	0	0
	18/set	0	0	0	0
	25/set	0	6,4	9,6	16
	27/set	9,6	11,8	41,9	63,3
	03/out	11	1,4	0,8	13,2
	18/out	0	8,2	0,2	8,4
	01/nov	14,4	0	0	14,4
06/nov	0	15	1,2	16,2	
10/nov	0	21,6	0,2	21,8	
16/nov	0	13,8	11,8	25,6	
22/nov	0	0	11,8	11,8	
23/nov	0	11,8	1,2	13	
25/nov	1,2	0	22,6	23,8	
08/dez	1	0	6,2	7,2	
14/dez	22,2	47	33,6	102,8	

Relação das Chuvas e passagem de Sistemas Frontais e Cavados Baroclínicos em São Paulo					
	Data passagem	Chuva 1 dia antes	Chuva no dia	Chuva 1 dia depois	Total chuva (mm)
2011	05/jan	30,4	1,8	25,7	57,9
	20/mar	3,2	2	0,2	5,4
	04/abr	34,4	13,4	0,8	48,6
	24/abr	0	0	0	0
	26/abr	0	0,4	0	0,4
	02/mai	0	18,6	1,4	20
	10/mai	0	0	0	0
	20/mai	0	0	0	0
	27/mai	0	1,6	0	1,6
	04/jun	0	0	0	0
	08/jun	0	23,6	0	23,6
	14/jun	0	0	0	0
	26/jun	0	0	19,6	19,6
	03/jul	0	0	0	0
	22/jul	0	0,5	0	0,5
	31/jul	0	0	4	4
	01/ago	4	0	0,6	4,6
	02/ago	0	0,6	0	0,6
	10/ago	0	2,3	0	2,3
	14/ago	0	0	0	0
	20/ago	0	4,6	10	14,6
	24/ago	0	1,1	0	1,1
	26/ago	0	2,6	0	2,6
	30/ago	0	0	25	25
	06/set	0	0	0	0
	10/set	0	0	0	0
	11/set	0	0	0	0
	14/set	0	0	0	0
	15/set	0	0	0	0
	21/set	0	0	0	0
24/set	0	1,2	0	1,2	
05/out	0	0	0	0	
15/out	12,7	5	28,3	46	
24/out	0	0	2,4	2,4	
13/nov	0	0	25,5	25,5	
15/nov	25,5	34,7	20,2	80,4	
22/nov	0	0	7	7	
02/dez	0	5,2	0	5,2	
14/dez	0	5,8	4,7	10,5	
25/dez	0	2,4	1,2	3,6	
26/dez	2,4	1,2	6,6	10,2	

Relação das Chuvas e passagem de Sistemas Frontais e Cavados Baroclínicos em São Paulo					
	Data passagem	Chuva 1 dia antes	Chuva no dia	Chuva 1 dia depois	Total chuva (mm)
2012	26/jan	0	11,2	15,8	27
	11/fev	0,3	30,6	25,9	56,8
	04/mar	8,7	0,2	0	8,9
	16/mar	0	34,2	0,9	35,1
	28/mar	0	15,1	3	18,1
	11/abr	0	2,2	10,7	12,9
	16/abr	1,3	2	0,2	3,5
	23/abr	5,7	0,3	0	6
	27/abr	0	14,6	1,4	16
	30/abr	9,2	33,4	31,4	74
	13/mai	1,8	0,4	0,4	2,6
	31/mai	0	0	0	0
	05/jun	0	32,6	35,4	68
	21/jun	43,6	10,9	19,7	74,2
	08/jul	0	21,2	0,2	21,4
	12/jul	0	0,4	4,8	5,2
	16/jul	0	4,2	9,6	13,8
	18/jul	9,6	22	0	31,6
	28/jul	0	0	0	0
	06/ago	0	0	0	0
	14/ago	0	0	0	0
	26/ago	0	0	0	0
	04/set	0	0,2	0	0,2
	11/set	0	0	0	0
	15/set	0,7	0	0	0,7
	20/set	0	1,3	1,7	3
	22/set	1,7	4,7	0	6,4
	26/set	2,3	9,2	0	11,5
	11/out	0	0	16,8	16,8
	24/out	9,4	12,5	0	21,9
13/nov	37,8	6,7	0,4	44,9	
25/nov	0	6,2	0,8	7	

Relação das Chuvas e passagem de Sistemas Frontais e Cavados Baroclínicos em São Paulo

	Data passagem	Chuva 1 dia antes	Chuva no dia	Chuva 1 dia depois	Total chuva (mm)
2013	02/jan	0	0	0	0
	10/jan	17,5	11,1	3,4	32
	27/jan	12	4,3	1	17,3
	04/fev	6,8	39,6	0,6	47
	11/fev	4,5	27,6	0	32,1
	14/mar	2,6	1,5	0	4,1
	17/mar	0	9,1	25,8	34,9
	14/abr	26,6	14,1	0	40,7
	06/mai	0	6	0	6
	08/mai	0	0	0	0
	17/mai	0	0	0	0
	31/mai	7,8	0	0	7,8
	03/jun	0	8,3	0,4	8,7
	22/jun	00/jan	0	0	0
	30/jun	0	18,2	16,2	34,4
	08/jul	0	0	0	0
	16/jul	0	0	0	0
	20/jul	0	5,2	8,3	13,5
	22/jul	8,3	2,4	10,4	21,1
	02/ago	0	0	0	0
	11/ago	0	0	0	0
	14/ago	0	2,6	1,3	3,9
	27/ago	0	3	0	3
	04/set	0	3	0	3
	18/set	5,4	3,7	18,6	27,7
	23/set	0	32,8	12	44,8
	04/out	0	27	0	27
	05/out	27	0	0	27
	22/out	0	1,8	0	1,8
	25/out	0	0	0	0
	28/out	0	0,2	0	0,2
	05/nov	0	22,2	1,6	23,8
	13/nov	0	0,3	0	0,3
	17/nov	0	17,8	3	20,8
19/nov	3	1,4	4,5	8,9	
23/nov	6,6	4,9	17,5	29	
30/nov	0	0	0	0	
06/dez	0	24,6	0	24,6	

Relação das Chuvas e passagem de Sistemas Frontais e Cavados Baroclínicos em São Paulo					
	Data passagem	Chuva 1 dia antes	Chuva no dia	Chuva 1 dia depois	Total chuva (mm)
2014	04/jan	0	0	2,6	2,6
	13/jan	1,2	13,6	17,8	32,6
	15/fev	0	57,4	71,2	128,6
	16/fev	57,2	71,2	14,1	142,5
	24/fev	7,6	0	4,2	11,8
	28/fev	0,2	20	32,2	52,4
	02/mar	32,2	9	0	41,2
	06/mar	1	6,6	5	12,6
	19/mar	0	0,8	0	0,8
	21/mar	0	5,2	8,2	13,4
	14/abr	49,8	0	1,6	51,4
	21/abr	0	0,2	0	0,2
	25/abr	0	0	0	0
	09/mai	0	0	0	0
	23/mai	0	14,8	10,5	25,3
	26/mai	11,2	11,6	0	22,8
	02/jun	0	0	0	0
	09/jun	0	0	0	0
	19/jun	0	0,2	0	0,2
	29/jun	0	0	0	0
	08/jul	0	4,4	1,5	5,9
	19/jul	0	0	0	0
	25/jul	0	3,4	0	3,4
	05/ago	0	0	0	0
	13/ago	0	0	14,3	14,3
	26/ago	0	0	5,2	5,2
	03/set	0	17,6	0	17,6
	16/set	0	0	0	0
	19/set	0	2	1,2	3,2
	21/set	1,2	4,8	0	6
	28/set	20,8	0	0	20,8
	02/out	2	1,4	0,4	3,8
21/out	4,8	1,4	0	6,2	
23/out	0	0	0	0	
06/nov	24	3,8	0	27,8	
14/nov	0	6	0,2	6,2	
23/dez	0	54,4	30,8	85,2	

Relação das Chuvas e passagem de Sistemas Frontais e Cavados Baroclínicos em São Paulo					
	Data passagem	Chuva 1 dia antes	Chuva no dia	Chuva 1 dia depois	Total chuva (mm)
2015	01/jan	0	0	0	0
	03/jan	0	0	1,2	1,2
	22/jan	0	31	3,6	34,6
	31/jan	0	9,9	0	9,9
	16/fev	17,4	22,7	85,3	125,4
	17/fev	22,7	85,3	13,4	121,4
	25/fev	0	2	34,3	36,3
	09/mar	69,2	77	9,7	155,9
	17/mar	22,4	24,2	0	46,6
	06/abr	0	0	7,1	7,1
	22/abr	0	2,4	14,6	17
	30/abr	0	0	0	0
	05/mai	1	9,9	0	10,9
	08/mai	0	0	0	0
	20/mai	0,2	0	0	0,2
	28/mai	0	1,8	7,2	9
	12/jun	0	0	0	0
	15/jun	0	0	9	9
	19/jun	0	3,8	0	3,8
	24/jun	0	3,8	1	4,8
	26/jun	1	0	0	1
	04/jul	17,8	15,4	4,4	37,6
	09/jul	4,5	0	0	4,5
	21/jul	0	0	0	0
	19/ago	0	0	0	0
	28/ago	2,6	25	0	27,6
	02/set	0	0,4	0	0,4
	12/set	31,8	27,6	0	59,4
	29/set	27,2	0	0	27,2
	04/out	25	0,2	0	25,2
	12/out	0	0	2,4	2,4
	17/out	0	0	0	0
26/out	0	28,4	0	28,4	
03/nov	39,6	3,4	6,8	49,8	
09/nov	0,6	4,4	10,4	15,4	
10/nov	4,4	10,4	0	14,8	
16/nov	8,6	0	0	8,6	
21/nov	7,4	7	0	14,4	
27/nov	0	0	0	0	
30/nov	17,4	23,4	0	40,8	
06/dez	0,2	0,2	47,8	48,2	

Relação das Chuvas e passagem de Sistemas Frontais e Cavados Baroclínicos em São Paulo					
	Data passagem	Chuva 1 dia antes	Chuva no dia	Chuva 1 dia depois	Total chuva (mm)
2016	12/jan	8,6	8	0,6	17,2
	29/jan	35	0	2,4	37,4
	31/jan	2,4	0	0	2,4
	28/fev	17	0,2	30,8	48
	05/mar	31,2	0,4	0	31,6
	10/mar	0	0	87,2	87,2
	26/mar	0,2	22,4	0	22,6
	08/abr	0	0	0	0
	11/abr	0	0	0	0
	27/abr	0	1,8	0	1,8
	30/abr	0	0	0	0
	05/mai	0	0	0	0
	12/mai	0	0	0	0
	17/mai	2,5	3,2	0	5,7
	23/mai	6,4	17,5	0	23,9
	02/jun	1,2	22	8,4	31,6
	07/jun	30,6	51,6	0	82,2
	20/jun	0	0	0	0
	07/jul	0	0	0	0
	17/jul	0	6,4	0	6,4
	27/jul	0	0	0	0
	02/ago	0	0	0	0
	07/ago	0	0	0	0
	10/ago	0	0	0	0
	19/ago	12	0	0	12
	20/ago	0	0	46	46
	21/ago	0	46	11	57
	30/ago	0	0	8,2	8,2
	07/set	10,8	0	0	10,8
	14/set	0	0	0	0
	20/set	7	0	0	7
	24/set	0	0	0	0
	30/set	0	0	0	0
	03/out	0	0	14,6	14,6
	09/out	0	0	0	0
	22/out	4,4	0	0	4,4
	27/out	5	16,6	3,2	24,8
	04/nov	7	2,5	0	9,5
	06/nov	0	0	35,4	35,4
	09/nov	0	0	36	36
	12/nov	0	3,4	8,8	12,2
	14/nov	8,8	21,7	0	30,5
18/nov	17	0	0	17	
22/nov	0	0	3,4	3,4	
30/nov	27	1,2	0	28,2	
15/dez	0	0	0	0	
17/dez	0	0	0	0	