ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

# CARACTERÍSTICAS DAS FRENTES FRIAS COM POTENCIAL PARA PROVOCAR CHUVAS INTENSAS NA REGIÃO SERRANA DE RIO DE JANEIRO

SELUCHHI, Marcelo E. - marcelo.seluchi@cemaden,gov,br
Doutor em Ciências Atmosféricas, Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN)/MCTI (Brasil)

BEU, Cássia M. L. – cassia.beu@cemaden.gov.br
Mestre em Meteorologia, Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN)/MCTI (Brasil)

ANDRADE, Kelen M.- kelen.andrade@cemaden.gov.br
Mestre em Meteorologia, Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN)/MCTI (Brasil)

**RESUMO:** A Região Serrana do Estado de Rio de janeiro é uma das mais expostas aos desastres naturais devido à sua orografia, climatologia e ocupação demográfica desordenada. Boa parte da precipitação anual nessa região é explicada pela atuação de sistemas frontais. Neste trabalho se realiza uma caracterização das frentes frias responsáveis pelos maiores volumes pluviométricos diários. As situações foram escolhidas utilizando critérios objetivos aplicados às análises do CFSR para o período 1998-2010. Os dados de precipitação utilizados incluem dados de pluviômetros locais e estimativas por sensores remotos. As frentes causadoras dos maiores acumulados diários ocorrem durante o semestre quente do ano. Nesse período elas se diferenciam dos sistemas que causam chuvas inferiores a 5.0 mm/dia já com dois dias de antecedência, quando a frente fria se encontra sobre o Uruguai. Inicialmente, a presença de uma onda relativamente barotrópica sobre o Oceano Atlântico prolonga a advecção de ar quente e úmido desde o Noroeste sobre o centro-sul do país. O posterior acoplamento dessa perturbação com uma onda mais curta e baroclínica determina o avanço mais rápido da frente fria, assim como sua intensificação em termos de contraste de temperatura, advecção de vorticidade e divergência em altura. Esses fatores, somados à maior umidade e temperatura da massa de ar precedente, explicam a ocorrência de chuvas mais volumosas.

**PALAVRAS CHAVE:** frentes frias, extremos de chuva, Região Serrana de Rio de Janeiro

*CHARACTERISTIS OF COLD FRONTS WITH POTENTIAL TO CAUSE HEAVY RAINFALL OVER THE MONTAINOUS REGION OF RIO DE JANEIRO*

**ABSTRACT:** The mountainous region of the Rio de Janeiro State is particularly exposed to natural disasters due to its topography, climatology and disorderly demographic occupation. Most of the annual rainfall in this region is explained by cold fronts passages. This article perform a characterization of cold fronts responsible for the highest daily rainfall volumes. Frontal situations were chosen using an objective criteria applied to CFSR analysis during the period 1998-2010. Precipitation data include local rain gauges data and remote sensing estimations. Fronts causing major daily precipitation occur during the warmer period of the year. During this season they differ from systems causing rainfall lower than 5.0mm/day even two days in advance, when the cold fronts locate over Uruguay. Initially, the existence of a relatively barotropic wave on the Atlantic Ocean prolongs the warm and moist air advection from the north-west to the southern Brazil. The subsequent coupling of this disturbance with a shorter and more baroclinic wave cause a faster frontal displacement, as well as its intensification in terms of temperature contrast, vorticity advection and upper levels divergence. These factors, combined with a highly humid and warm prefrontal air mass, explain the occurrence of more massive rains.

**KEYWORDS:** cold fronts, extreme precipitation. Mountainous Region of Rio de Janeiro

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

## 1. INTRODUÇÃO

O número de desastres naturais (DNs) está aumentando no mundo nas últimas décadas (Marcelino, 2008), devido a diversos fatores, como o incremento explosivo da população, a ocupação desordenada do território, as alterações do uso do solo e as mudanças climáticas, tanto de índole natural como antropogênicas, entre outros fatores.

Segundo o *Emergency Events Database* (EM-DAT), o maior número de DNs durante o período 1900-2006 foi causado por inundações (35%) e tempestades severas (31%). Contudo, os deslizamentos de terra, que concentram aproximadamente o 15% do total de DNs, provocam as maiores perdas humanas devido a sua natureza repentina e menos previsível. O EM-DAT mostra também que o continente americano detém o segundo maior número de ocorrências deste tipo, com mais de 2400 registros. Por outro lado, Tobin e Montz (1997) destacam que mais do 95% das mortes decorrentes de DNs ocorrem em países em desenvolvimento, devido fundamentalmente ao maior número de pessoas expostas. Dentro desse conjunto de países, aqueles que apresentam um clima tropical, com alta frequência de chuvas intensas, principalmente de caráter convectivo, somados a uma topografia complexa apresentam ainda uma maior exposição aos DNs. Nesse contexto, o Brasil torna-se um dos países do mundo mais expostos a mortes decorrentes de DNs. Dados oficiais da Defesa Civil apontam que existe uma clara distribuição geográfica dos diferentes tipos de DNs, sendo que os deslizamentos de terra concentram-se principalmente nas regiões montanhosas das regiões Sul e Sudeste. Em particular, o Estado de Rio de Janeiro aparece como o mais vulnerável, tendo sido afetado por vários eventos graves, como pode ser ilustrado na tabela I.

Tabela I: listagem dos principais desastres naturais recentes no Estado de Rio de Janeiro, resultantes da ocorrência de deslizamentos de terra. Fonte Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Catástrofes (CENAD).

| Local | Data | Chuva | Vítimas FATAIS |
|---|---|---|---|
| **Petrópolis** | 23 de Dezembro 2001 | 300mm/48 h | **38** |
| **Angra dos Reis** | 09 de Dezembro 2002 | 143mm/24h | **35** |
| **Teresópolis** | 21 de Dezembro 2002 | 140mm/4h | **22** |
| **Petrópolis** | 11 de Janeiro de 2003 | 140mm/40 min | **17** |
| **Angra dos Reis** | 01 de Janeiro de 2010 | 275mm/24h | **53** |
| **Rio de Janeiro** | 06 de Abril de 2010 | 236mm/36h | **68** |
| **Região Serrana** | 12 de janeiro de 2011 | 297mm/24h | **917** |
| **Sapucaia** | 9 de Janeiro de 2012 | ~135mm/24h | **24** |
| **Teresópolis** | 06 de Abril de 2012 | 216mm/6h | **05** |

A grande vulnerabilidade do Estado de Rio de Janeiro decorre do alto número de pessoas expostas, assim como das características topográficas e climáticas. As

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

precipitações, frequentemente de tipo convectivo, podem estar associadas à convecção monçônica durante o verão, mas também a atuação de sistemas de escala maior como frentes frias e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). O trabalho de Derekzynski et al. (2009), que realiza uma climatologia detalhada da precipitação no Município de Rio de Janeiro, destaca que 77% das precipitações ao longo do ano foram provocadas pela passagem de frentes frias. Resultados semelhantes, embora com percentagens diferentes, foram achados por Blanco (1999) e Seluchi e Chou (2009) na Serra do Mar. Contudo, não há na literatura artigos que analisem do ponto de vista estatístico as condições atmosféricas sob as quais esses sistemas provocam precipitações com potencial destruidor. Talvez o artigo que mais explora esse fato seja o de Seluchi et al. (2009), que analisa a situação meteorológica precursora de deslizamentos de terra graves (fatais) no trecho paulista da Serra do Mar. Esses autores determinaram que tanto a ocorrência de episódios de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) como de frentes frias, podem provocar esse tipo de situação. Um resultado semelhante foi obtido por Dolif e Nobre (2012) para a cidade de Rio de Janeiro.

As considerações anteriores enfatizam a necessidade de aprofundar o estudo sobre as condições atmosféricas que determinam a intensidade das precipitações frontais sobre o Estado de Rio de Janeiro. Assim, este trabalho tem como objetivo principal, determinar as características dinâmicas e termodinâmicas principais das frentes frias com potencial para causar chuvas extremas no Região Serrana de Rio de Janeiro (RSRJ). Os resultados poderão ser de utilidade para melhorar a previsão de situações com potencial para causar perda de vidas e/ou bens materiais nessa região de alta vulnerabilidade.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

Para atingir os objetivos deste trabalho, foi realizada uma climatologia das frentes frias nas proximidades do Estado de Rio de Janeiro, na região delimitada pela caixa 1 do painel superior da Figura 1 (24°S a 21ºS e 48°O a 45°O). Foram utilizados para as reanálises do Climate Forecast System Reanalysis (CFSR), desenvolvido pelo National Center Environmental Prediction (NCEP) (SAHA et al., 2010), com resolução horizontal de 0,5°. O período utilizado foi de 1998 a 2010, em função da disponibilidade de dados de chuva adequados.

Para a identificação dos sistemas frontais foi utilizado um critério semelhante ao definido por Andrade (2005), que determina a presença de um sistema frontal quando a pressão ao nível médio do mar aumenta mais de 2hPa; a temperatura cai mais de 2°C e a direção do vento muda do quadrante norte para o quadrante sul em 925 hPa. Essas mudanças devem ocorrer em média sobre a área considerada (Caixa 1 da Figura 1) e devem ser observadas em dias consecutivos. Os limiares de 2hPa e 2°C foram determinados a partir da média mensal de queda de temperatura e aumento da pressão na caixa 1 da Figura 1.

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

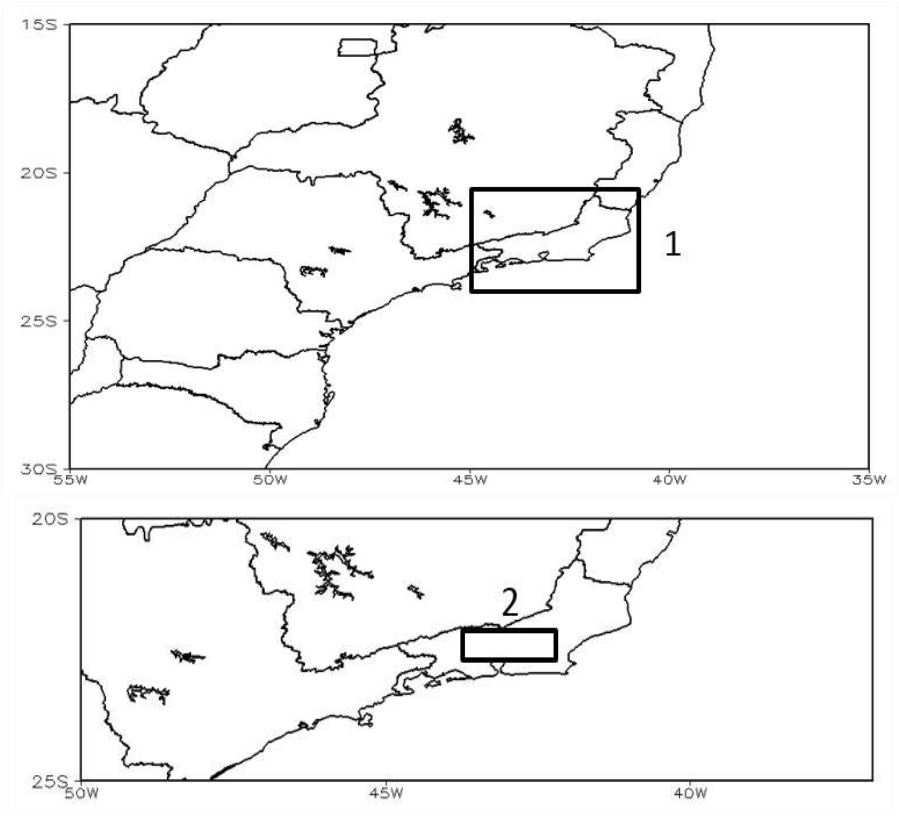


Figura 1: Áreas utilizadas para o estudo: O critério de escolha das frentes frias foi aplicado à área 1 do painel superior. O critério para determinar as frentes frias mais/menos chuvosas foi aplicado aos dados de precipitação diária dentro da caixa 2 do painel inferior.

Os eventos de chuva extrema foram escolhidos sobre uma área menor, mostrada na caixa 2 do painel inferior da Figura 1, na Região Serrana do Rio de Janeiro. Para isso foram utilizados os dados de precipitação do produto MERGE/INPE, que resultam da combinação de observações pluviométricas e informações do TRMM, descritos em Rozante et al. (2010). Os eventos extremos foram escolhidos utilizando uma metodologia semelhante à proposta por May (2004) e Teixeira e Satyamurty (2007), baseada no cálculo dos quantis diários. Assim, foram separadas, em princípio, as frentes frias cuja precipitação diária se encontra no 10% inferior e superior da série de precipitação.

A análise das condições dinâmicas e termodinâmicas foi realizada a partir da composição de diversos campos troposféricos médios e suas anomalias, desde 2 dias antes da passagem das frentes frias. As anomalias foram calculadas com respeito à média do período 1980-2010, ponderando-se as respectivas médias mensais pelo número de casos selecionados em cada mês. Finalmente, para fins de comparação, foi calculada a diferença entre os campos correspondentes aos extremos mais chuvosos e secos da série. Para esse cálculo, as diferenças também foram ponderadas levado em conta o número de casos observados em cada mês.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Frentes frias associadas a chuvas extremas

Ao longo dos 13 anos analisados foram escolhidos, seguindo a metodologia descrita na seção anterior, 317 frentes frias. Esse número representa uma média

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

aproximada de um sistema a cada 15 dias, semelhante ao obtido em outros artigos publicados na literatura (FOSS, et al, 2014, CAVALCANTI e KOUSKY, 2009).

Como destacado anteriormente, as frentes frias foram classificadas como "chuvosas" quando a precipitação diária supera o percentil 90% da série total. Sendo que o limiar para esses casos foi ligeiramente superior a 20 mm (23.3mm), se optou por considerar na categoria "frente fria chuvosa" a todos os casos cuja precipitação diária superou 20.0mm. Desta forma se obtiveram 43 situações.

A Figura 2 mostra que as frentes frias que provocam chuvas mais abundantes na RSRJ apresentam uma clara distribuição anual, com máxima frequência durante o semestre mais quente do ano (correspondente aproximadamente à estação chuvosa da Região Sudeste) e um mínimo durante o semestre mais frio. Esse resultado sugere que o volume das chuvas está ligado não só à situação sinótica dominante, senão também ao conteúdo de umidade ou a instabilidade termodinâmica do ar. Em consequência, a intensidade dos sistemas frontais (em termos de contraste de temperatura), normalmente maior durante o inverno, não parece ser um fator determinante para o volume pluviométrico,

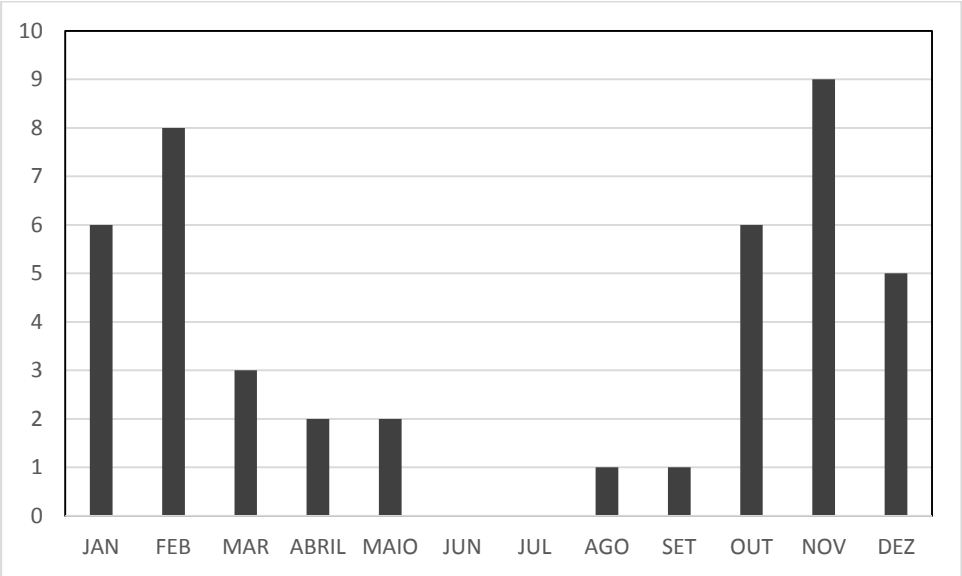


Figura 2: Distribuição anual do número de frentes frias na Região Serrana do Rio de Janeiro com precipitação diária superior a 20mm.

A Figura 3 apresenta os campos de chuva correspondentes ao dia da passagem das frentes frias chuvosas (Figura 3c) pela RSRJ, assim como às 24 e 48 horas anteriores a sua passagem (Figuras 3a e 3b, respectivamente), onde pode se observar um padrão típico de frente fria, com uma banda precipitante que apresenta orientação de noroeste para sudeste. Com antecedência de 48h (Figura 3a) os maiores volumes pluviométricos ocorrem sobre a Região Sul, especialmente sobre o Rio Grande do Sul, e no litoral do estado de São Paulo no dia posterior. No dia da passagem das frentes frias sobre a RSRJ é muito interessante destacar que o máximo de precipitação se concentra sobre a área alvo do estudo, o que significa que os casos selecionados correspondem efetivamente a situações de máximos pluviométricos absolutos sobre a RSRJ e não apenas a situações chuvosas sobre uma grande área.

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

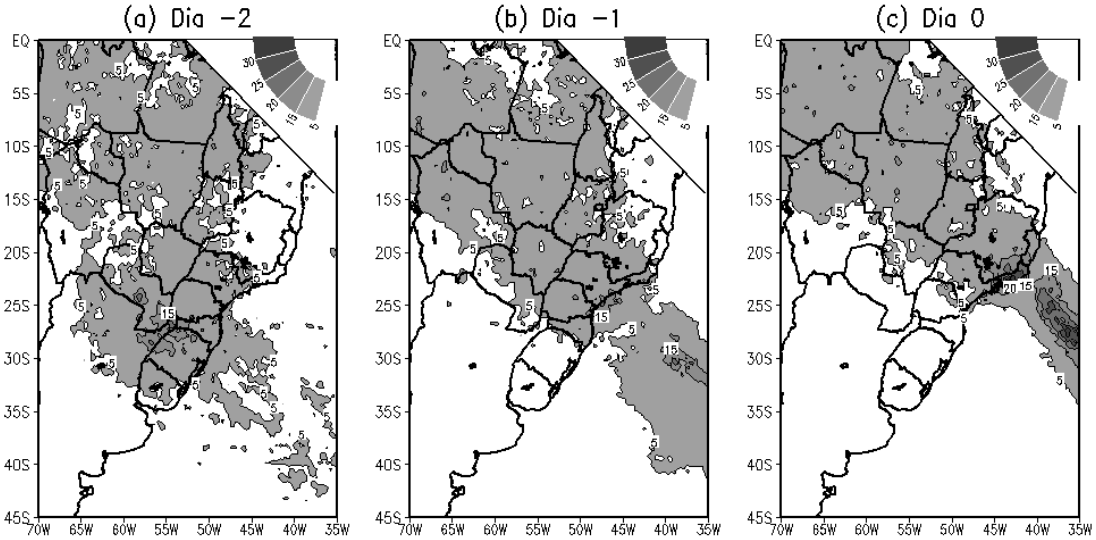


Figura 3: Campo médio de precipitação (mm/dia) correspondente a dois dias antes (a), um dia antes (b) e ao dia (c) da passagem de frentes frias chuvosas pela Região Serrana do Rio de Janeiro.

A Figura 4 mostra a situação sinótica média obtida durante o dia da passagem das frentes frias chuvosas pela RSRJ. Em termos gerais a presença do sistema frontal se torna evidente em todos os campos escolhidos. O campo de pressão reduzida ao nível do mar (Figura 4a) apresenta um cavado sobre o Oceano Atlântico que encosta no continente nas proximidades do estado de Rio de Janeiro, acompanhado ao sul por um intenso gradiente de espessura 500/1000 hPa, que indica forte contraste térmico e baroclinia. Um anticiclone com características pós-frontais (frio e seco) pode também ser detectado entre o leste da Argentina e o Uruguai. O campo de umidade específica e vento em 850hPa (Figura 4b) mostra claramente um forte contraste de umidade associado à presença do sistema frontal, sendo que o maior conteúdo de umidade ocorre exatamente nas proximidades do estado de Rio de Janeiro. Notar que os ventos de noroeste superpostos ao eixo de máxima umidade específica sugerem um transporte importante de umidade desde a Amazônia para a Região Sudeste. Nos níveis médios (500 hPa, Figura 4c) pode se observar o cavado frontal de onda relativamente curta, associado a uma apreciável baroclinia sobre o sul do pais, denotada pelo gradiente de temperatura (linhas tracejadas) e pela clara defasagem entre a onda térmica (temperatura) e de massa (altura geopotencial). Nos altos níveis (Figura 4d) destaca-se uma circulação típica de verão, incluindo a presença da Alta de Bolívia (LENTERS e COOK, 1997), consistente com a maior frequência de frentes frias chuvosas durante o semestre quente do ano. Sobre o Oceano Atlântico, o cavado frontal (posicionado ligeiramente mais para oeste em relação ao nível de 500 hPa) produz divergência nas proximidades da frente fria em superfície. Esse processo pode contribuir, junto com o conteúdo de umidade nos baixos níveis, para incrementar as precipitações.

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

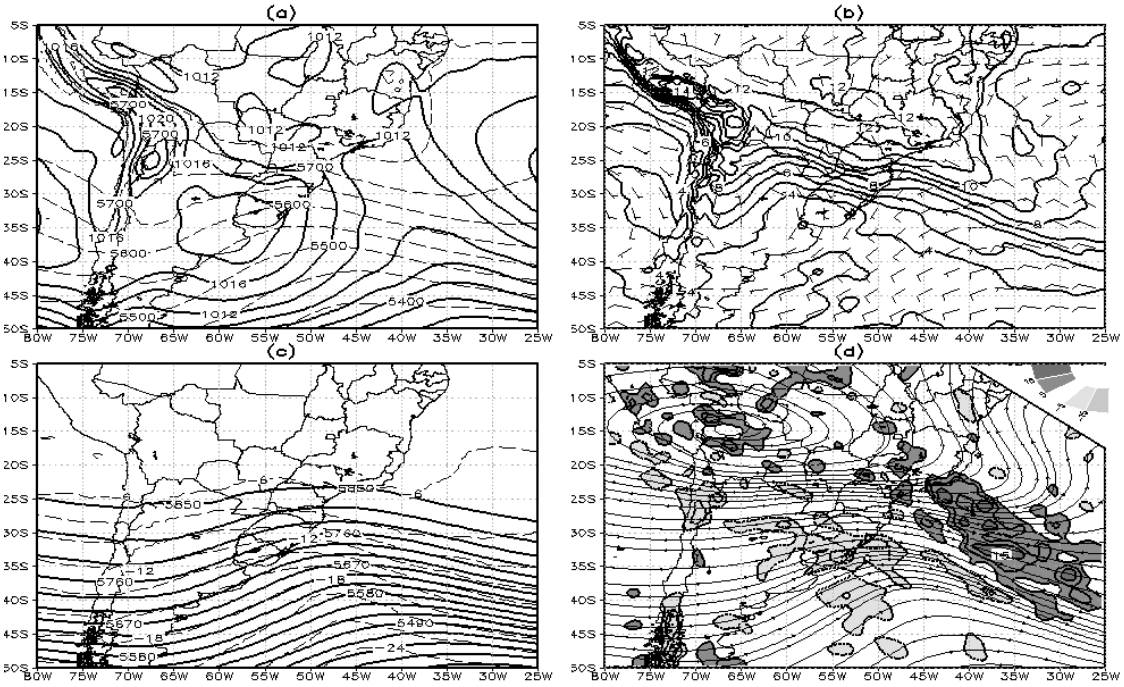


Figura 4: Campo médio de (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), contornos e espessura 500/1000 hPa (mgp) linhas tracejadas, (b) umidade específica (g/Kg, contornos) e vento (m/s, barbelas) no nível de 850 hPa, (c) altura geopotencial (mgp), contornos e temperatura (°C), linhas tracejadas em 500 hPa, (d) linhas de corrente e divergência ($10^{-6}$ $s^{-1}$) tons de cinza, correspondes aos dias de passagem de frentes frias chuvosas pela Região Serrana de Rio de Janeiro.

Para aprofundar a análise da situação sinótica durante a passagem de frentes frias causadoras de chuvas mais volumosas na RSRJ, a Figura 5 mostra os campos de anomalias, com respeito à média 1980-2010, dos mesmos campos apresentados na figura anterior. As anomalias de pressão e espessura 500/1000hPa (Figura 5a) evidenciam a presença de uma típica onda baroclínica, a partir da alternância de anomalias positivas e negativas e da defasagem entre as ondas de massa e temperatura. Note-se que a distância entre as anomalias positivas e negativas de pressão (ou de altura geopotencial na Figura 5c) sugere a atuação de uma onda relativamente curta (equivalente aproximadamente a um número de onda 8-10) e, consequentemente, de deslocamento relativamente rápido. Outro ponto de destaque é que tanto o cavado frontal quanto o anticiclone pós frontal atingem latitudes tropicais, mesmo se tratando de situações muito mais frequentes durante o semestre quente do ano. Em consequência o avanço de uma perturbação dinâmica até latitudes tropicais durante a estação chuvosa pode ser um elemento chave em relação à ocorrência de maiores acumulados de chuva. No campo de 850hPa (Figura 5b) fica mais evidente que na Figura 4a o contraste de umidade através da superfície frontal, assim como o eixo de máxima umidade específica que se estende desde o Oceano Atlântico em direção à Região Sudeste. No nível de 500hPa (Figura 5c) a perturbação baroclínica (cavado frio e crista quente) ficam mais restritos a latitudes maiores, mostrando uma forte inclinação dos sistemas na baixa e média troposfera. Esse fato é consistente com a presença de uma onda relativamente curta e rápida. Nos níveis mais elevados (250 hPa, Figura 5d) se destaca a anomalia positiva da divergência, fator favorável para o desenvolvimento de movimentos verticais ascendentes na média troposfera.

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

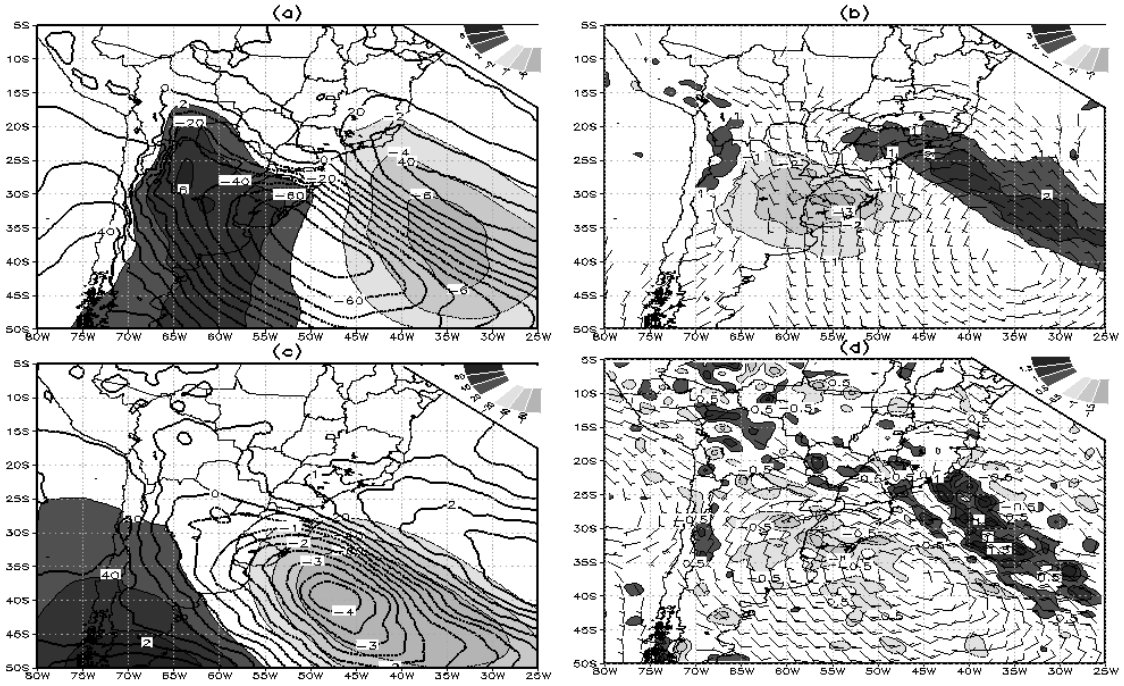


Figura 5: Campo médio de anomalias, com respeito à média 1998-2010 (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), tons de cinza e espessura 500/1000 hPa (mgp) contornos, (b) umidade específica (g/Kg), tons de cinza e vento (m/s, barbelas) no nível de 850 hPa, (c) altura geopotencial (mgp), tons de cinza, e temperatura (°C), contornos, em 500 hPa, (d) vento (m/s), barbelas, e divergência ($10^{-6}$ $s^{-1}$) tons de cinza, correspondes aos dias de passagem de frentes frias chuvosas pela Região Serrana de Rio do Janeiro. Os campos foram obtidos ponderando as médias mensais pelo número de casos selecionados em cada mês.

A Figura 6 é semelhante à Figura 5, porém corresponde a 48h antes da passagem dos sistemas frontais pela RSRJ. Ela permite concluir que a perturbação causadora das precipitações pode ser identificada com pelo menos dois dias de antecedência. A Figura 6a evidencia a presença de um cavado passando aproximadamente sobre o Uruguai, associado a um intenso gradiente de espessura 500/1000 hPa imediatamente ao sul. Esse sistema é precedido por uma massa de ar úmido no nível de 850 hPa sobre a Região Sul (Figura 6b) e influenciada por ventos anômalos de noroeste. A combinação dessas duas variáveis indica um transporte anômalo de umidade desde o sul da Amazônia que contribui para aumentar a instabilidade da massa de ar pré-frontal. O campo de 500 hPa (Figura 6c) sugere a presença de subsidência fraca sobre o Oceano Atlântico subtropical (anomalia positiva de temperatura e pequena anomalia positiva de geopotencial), que inibe nesse momento a convecção sobre a RSRJ, além da presença de um cavado frio ao sul do sistema frontal. Na alta troposfera (Figura 6d) se destaca uma extensa anomalia anticiclônica sobre a Região Sul e o reflexo do cavado frontal nesse nível, que apresenta pouca inclinação entre 250 e 500 hPa.

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

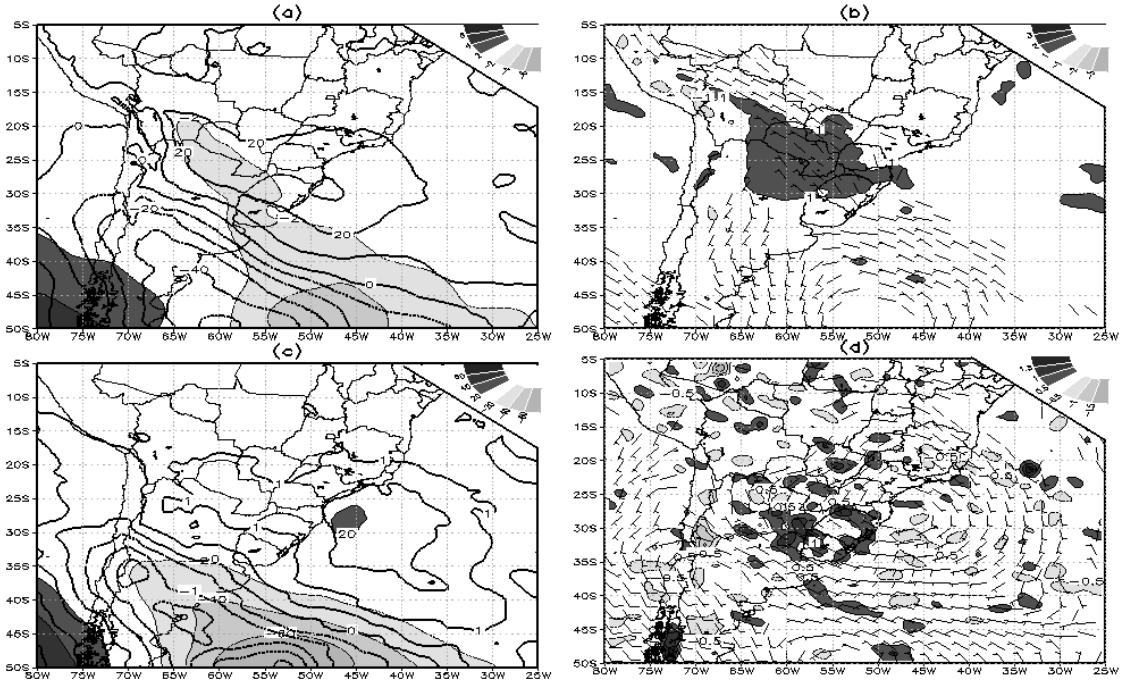


Figura 6: Igual à Figura 5, para dois dias antes da passagem das frentes frias chuvosas pela Região Serrana do Rio de Janeiro.

**Diferenças entre frentes frias chuvosas e não chuvosas**

As frentes frias "não chuvosas" que passam pela RSRJ foram definidas como aquelas que apresentam um total pluviométrico diário inferior ao 10% mais seco da série total. Assim, foram selecionados 50 sistemas frontais nos quais não foi observada precipitação dentro da caixa 2 da Figura 1. A Figura 7 mostra a distribuição anual das frentes frias que não causaram precipitação ao longo do ano, onde pode se apreciar um comportamento radicalmente oposto ao apresentado pelos casos chuvosos. As frentes frias sem acumulados pluviométricos ocorrem exclusivamente entre os meses de março e outubro, com uma frequência notavelmente maior nos meses de inverno. Novamente, pode se deduzir que o conteúdo de umidade, ou a instabilidade termodinâmica, são elementos cruciais para determinar o potencial pluviométrico das frentes frias na região estudada.

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

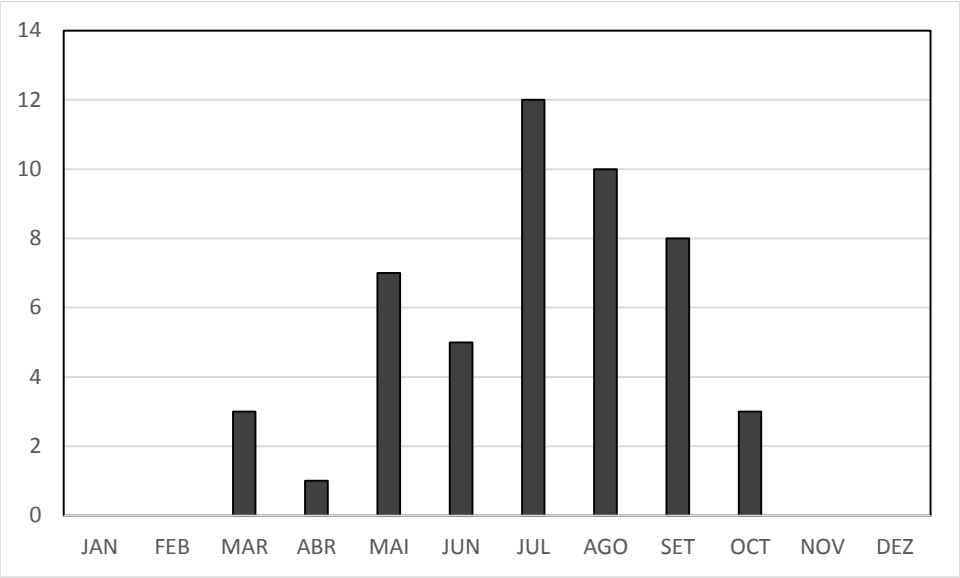


Figura 7: Distribuição anual do número de frentes frias na Região Serrana do Rio de Janeiro com precipitação diária inferior a 2.5mm.

Sendo que um dos objetivos deste trabalho é identificar e diferenciar as condições dinâmicas e termodinâmicas sob as quais as frentes frias apresentam um potencial maior para causar precipitações intensas sobre a RSRJ, e considerando a distribuição anual diferente entre os casos chuvosos e secos, foi selecionada uma sub amostra de casos onde a distribuição anual entre as frentes frias chuvosas e não chuvosas resultou semelhante. A nova amostra corresponde ao período compreendido entre os meses de outubro e abril (estação chuvosa), dentro do qual foram comparados os casos chuvosos previamente escolhidos (30 casos para esse período) com o 10% das frentes frias menos chuvosas. Esses casos (37) estão associados a uma precipitação diária inferior a 5 mm.

A Figura 8 apresenta as diferenças entre os campos pertencentes às frentes frias chuvosas menos os correspondentes às frentes frias não chuvosas, para as mesmas variáveis e níveis troposféricos mostrados anteriormente. O painel superior esquerdo (Figura 8a) indica que a perturbação frontal que causa chuvas mais intensas se diferencia dos casos mais secos pela intensidade da onda de pressão, tanto na profundidade do cavado frontal como da alta pós-frontal. Por outro lado, o gradiente de espessura 500/1000hPa, indicador do gradiente térmico nessa camada e do grau de baroclinia, é também claramente mais intenso. No nível de 850 hPa (Figura 8b) o campo de vento mostra um escoamento desde noroeste mais forte sobre a parte central do país, incluindo a RSRJ, assim como a atuação de uma massa de ar mais úmida. No nível de 500 hPa (Figura 8c) o cavado frontal é mais anômalo sobre o Oceano Atlântico e apresenta temperaturas mais baixas, provavelmente associados a movimentos ascendentes mais intensos. Note-se que a crista pós-frontal é também comparativamente mais aprofundada e quente que nos casos não chuvosos. Esse fato significa que as frentes frias mais chuvosas respondem a uma configuração determinada na escala sinótica, não respondendo apenas a condições termodinâmicas locais. Nos altos níveis a combinação dos cavados e cristas mais anômalos determinam a presença de divergência mais acentuada nos casos chuvosos. Esse fato pode contribuir a aumentar os movimentos verticais ascendentes, que são elementos fundamentais para produzir acumulados pluviométricos maiores.

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

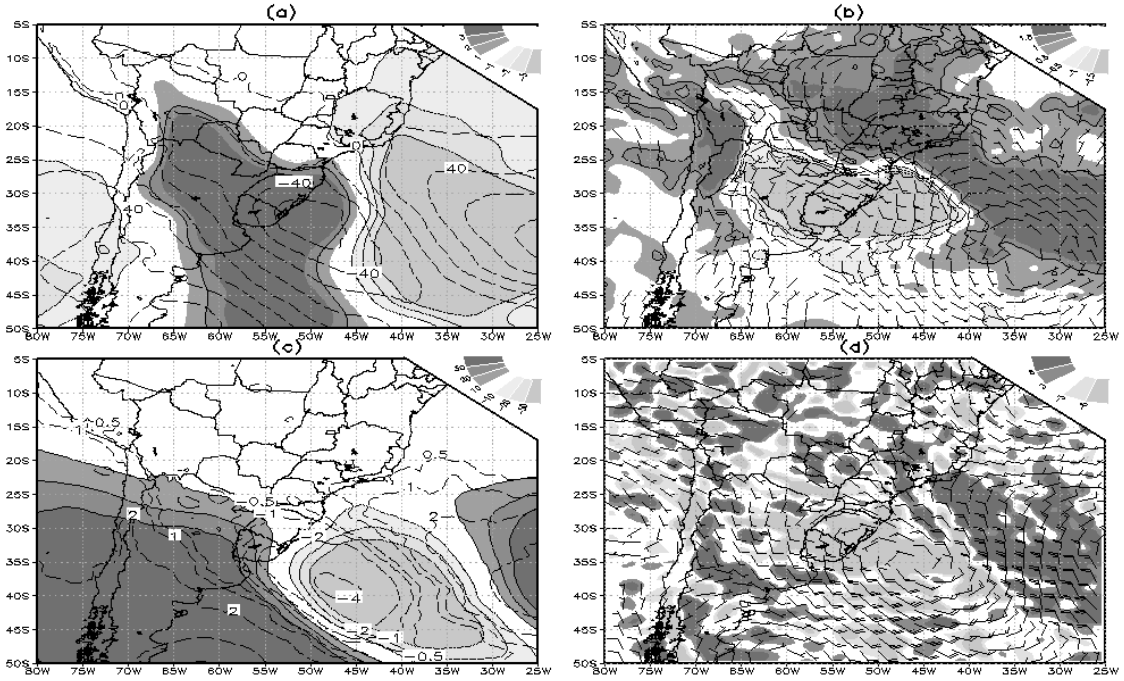


Figura 8: Diferenças entre os campos correspondentes à passagem de frentes frias chuvosas e não chuvosas pela Região Serrana de Rio de Janeiro (a) pressão ao nível médio do mar (hPa), tons de cinza e espessura 500/1000 hPa (mgp) contornos, (b) umidade específica (g/Kg), tons de cinza e vento (m/s, barbelas) no nível de 850 hPa, (c) altura geopotencial (mgp), tons de cinza, e temperatura (°C), contornos, em 500 hPa, (d) vento (m/s), barbelas, e divergência ($10^{-6}$ $s^{-1}$) tons de cinza. Os campos foram obtidos ponderando as médias mensais pelo número de casos selecionados em cada mês.

A presença de maiores temperaturas e teores de umidade na baixa troposfera, acompanhados de temperaturas mais baixas nos níveis mais elevados, conduz a condições termodinâmicas de maior instabilidade convectiva. Para analisar com maior detalhe essa característica a Figura 9 apresenta o campo de índices de levantamento (mais conhecidos pelo nome em inglês: Lifted Index), para as frentes frias chuvosas (Figura 9a) e não chuvosas (Figura 9b). A diferença entre esses campos aparece no painel da direita (Figura 9c). Essa última figura mostra que as frentes frias chuvosas estão associadas a massas de ar termodinamicamente mais instáveis sobre a maior parte do Brasil e do oceano adjacente. Em particular, o índice é comparativamente mais baixo (mais instável) sobre o Oceano Atlântico ao sul do Brasil e sobre a faixa que inclui desde o estado de Santa Catarina até Minas Gerais. É interessante notar novamente que as diferenças apresentam escala regional, e não local, indicando que as chuvas mais volumosas sobre a RSRJ respondem a uma determinada situação de escala sinótica. Contudo, o índice de levantamento médio, mostrado na Figura 9a, superior a 0°C sugere que o total de chuva acumulado diariamente não está vinculado (pelos menos em média) a situações de convecção profunda. Em outras palavras, embora são necessárias certas condições de instabilidade, a presença de elevada energia potencial convectiva não é uma condição estritamente imprescindível para a ocorrência de chuvas extremas durante a passagem de sistemas frontais pela RSRJ.

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

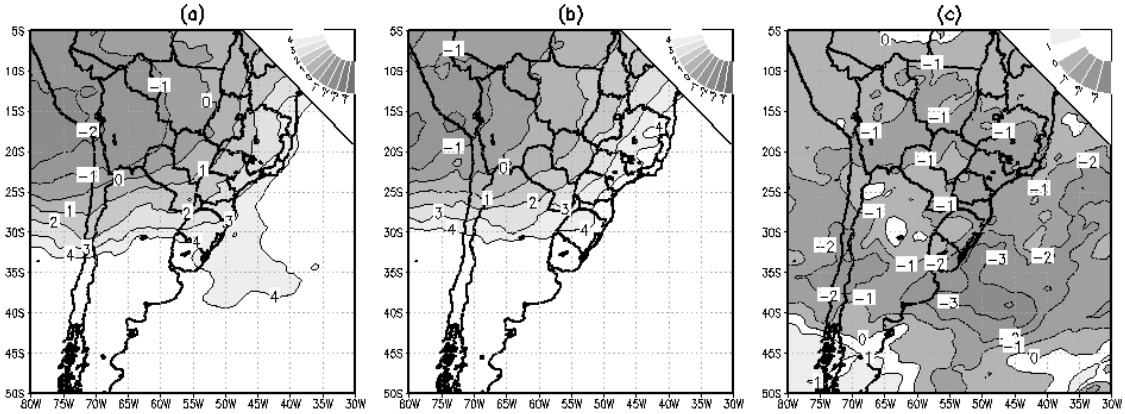


Figura 9: Índice de levantamento (°C) para (a) dias de passagem de frentes frias chuvosas pela Região Serrana de Rio de Janeiro, (b) dias de passagem de frentes frias não chuvosas pela Região Serrana de Rio de Janeiro e (c), diferença entre o campo (a) e o campo (b).

As características que distinguem as frentes frias causadoras de maiores volumes pluviométricos na RSRJ também podem ser identificadas com 48 horas de antecedência. A Figura 10a indica que o cavado frontal localizado, em média, nas proximidades do Uruguai é mais aprofundado e quente nos casos chuvosos, e que o gradiente de espessura 500/1000 hPa é também claramente mais intenso. No nível de 850 hPa (Figura 10b) o principal destaque é o maior conteúdo de umidade que, junto com a presença de temperaturas maiores, indicam uma condição termodinâmica mais favorável para a ocorrência de atividade convectiva. Essa característica é coerente com a presença de ventos de oeste e noroeste mais intensos sobre boa parte do Brasil. Em contraste, nos níveis mais elevados (500 e 250 hPa, Figuras 10c e 10d, respectivamente) as diferenças mais marcantes ocorrem nas latitudes mais altas. Um aspecto importante é a extensa crista com características relativamente mais barotrópicas localizada sobre o Oceano Atlântico. Esse sistema, provavelmente de deslocamento menos rápido, pode ser um elemento chave na evolução da situação sinótica, já que, junto ao cavado localizado mais para oeste, permite a maior persistência dos ventos de noroeste e, consequentemente, o incremento da temperatura e umidade sobre a maior parte do Brasil. Nessas condições a passagem de um sistema frontal mais intenso sobre a RSRJ pode disparar a ocorrência de precipitações abundantes.

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

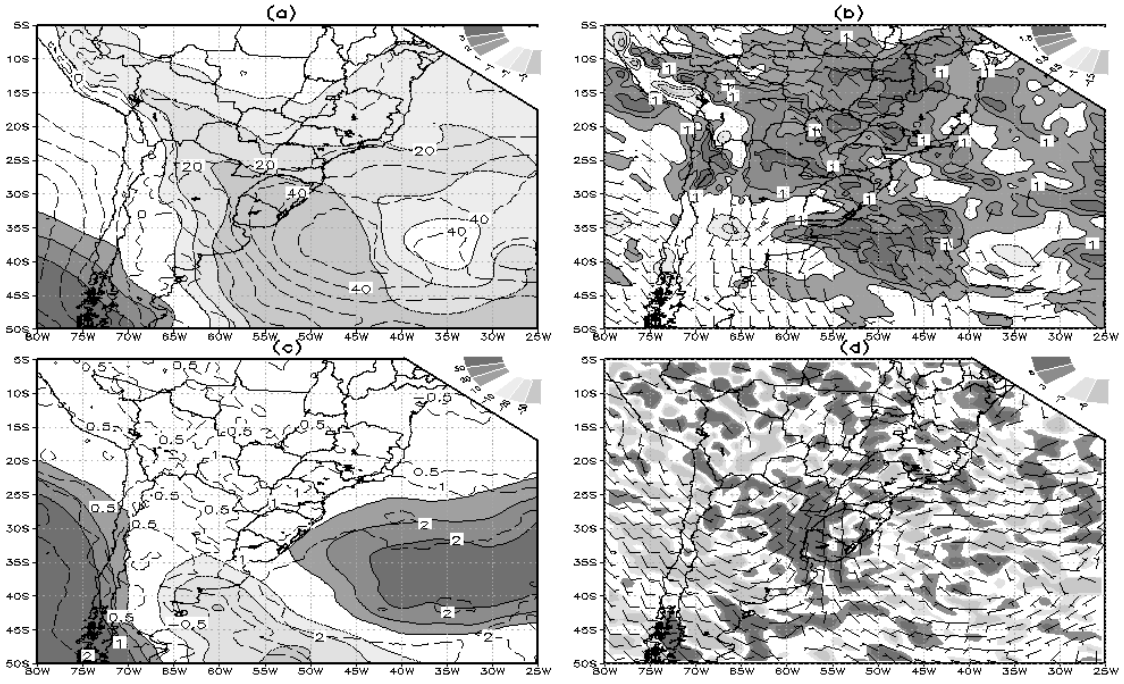


Figura 10: igual à Figura 9, mas para dois dias antes da passagem das frentes frias pela Região Serrana do Rio de Janeiro.

A comparação entre a Figura 3a e a Figura 10a permite deduzir que a frente fria posicionada sobre o Uruguai nas 48 horas prévias costuma estar associada à ocorrência de precipitação pré-frontal, já que os maiores acumulados pluviométricos se localizam sobre o Rio Grande do Sul. Esse fato é coerente com a presença de uma massa de ar mais quente e úmida e a presença de índices de levantamento mais baixos durante esse dia (figura não incluída).

## 4. **CONCLUSÕES**

A Região Serrana do Estado de Rio de Janeiro (RSRJ) apresenta um longo histórico de desastres naturais, incluindo a maior tragédia registrada no país em termos de perdas humanas. A alta vulnerabilidade, derivada fundamentalmente do elevado número de moradias construídas sobre terrenos íngremes e a ocorrência frequente de chuvas intensas, tornam essa região motivo de constante preocupação para a Proteção Civil. Neste trabalho se realiza uma análise das condições meteorológicas sob as quais os sistemas frontais provocam precipitações mais intensas nessa região. Segundo a literatura disponível, estes sistemas são responsáveis pelo maior volume pluviométrico anual. O estudo tem como base o período 1998-2010, no qual as frentes frias foram classificadas em "chuvosas" e "não chuvosas" em função do acumulado diário de precipitação.

As frentes frias, selecionadas a partir de critérios objetivos, representam, em média, situações meteorológicas onde os acumulados pluviométricos apresentam um máximo absoluto na RSRJ.

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

As frentes frias que provocam chuvas mais abundantes na RSRJ apresentam uma clara distribuição anual, com máxima frequência durante a estação chuvosa e mínima ocorrência durante o inverno. Esse fato demonstra a importância da condição termodinâmica, vinculada ao comportamento monçônico da atmosfera sobre latitudes tropicais da América do Sul. Contudo, as situações escolhidas não respondem a forçantes termodinâmicas de escala local, senão a configurações determinadas na escala sinótica.

A situação sinótica associada às frentes frias chuvosas sobre a RSRJ se destaca pela presença de um cavado frontal relativamente intenso e de um anticiclone pós-frontal que abrange o leste da Argentina e o Uruguai, cuja influência atinge latitudes relativamente baixas. Essa configuração permite um contraste de temperatura relativamente acentuado para a época, já que a maioria dos casos ocorre no verão. A distância entre o cavado frontal e a crista pós-frontal nos níveis médios da atmosfera indicam o predomínio de uma onda curta, fato que favorece a o incremento da advecção de vorticidade ciclônica e, portanto, dos movimentos verticais. Esse fato é coerente com a alta velocidade de deslocamento do sistema, que se desloca desde o Uruguai até a RSRJ em aproximadamente 48 horas, em média, e com a forte inclinação da rampa frontal na troposfera baixa e média. A presença de um ambiente anomalamente úmido nos baixos níveis cria condições termodinâmicas favoráveis para a ocorrência de chuva convectiva, embora os índices de instabilidade analisados não são indicativos de convecção intensa ou severa.

As frentes frias associadas a baixos acumulados pluviométricos diários ocorrem quase exclusivamente durante o semestre mais frio do ano, o que reforça a importância do ciclo sazonal na pluviometria da região, mesmo durante a passagem de sistemas frontais.

Durante o período novembro-abril, a diferença entre as frentes frias que causam precipitações diárias superiores a 20mm e aquelas que provocam acumulados inferiores a 5,0 mm/dia radica basicamente na intensidade da perturbação de escala sinótica. As frentes frias causadoras de volumes pluviométricos maiores apresentam um contraste térmico mais acentuado, vinculados à presença de cavados e cristas mais intensos em todos os níveis troposféricos. Nos baixos níveis a umidade específica é superior em mais de 1.5 g/kg nos casos chuvosos, o que determina condições termodinâmicas mais propícias para a ocorrência de convecção, também favorecidas pela maior divergência de massa presente nos altos níveis.

As frentes frias conducentes a precipitações mais volumosas na RSRJ podem ser identificadas, em média, dois dias antes da sua passagem através da presença de um cavado frontal sobre o Uruguai. Esse sistema se destaca pela temperatura mais elevada e pela intensidade do gradiente de espessura 500/1000 hPa (contraste térmico e baroclinia). Nos baixos níveis existe um maior conteúdo de umidade sobre o Sul e Sudeste do Brasil que, junto com a presença de temperaturas maiores, indicam uma condição termodinâmica mais favorável para a ocorrência de atividade convectiva. De fato, embora o cavado se situe sobre o Uruguai, os maiores acumulados ocorrem sobre o sul do Brasil, sugerindo a frequente ocorrência de convecção pré-frontal. Essa característica é coerente com a presença de ventos de oeste e noroeste mais intensos sobre boa parte do Brasil nas 48 horas prévias à passagem da frente fria pela RSRJ. A persistência e intensidade dos ventos anômalos de noroeste estão, em princípio, vinculados à atuação de uma extensa crista com características mais barotrópicas localizada sobre o Oceano Atlântico. Esse sistema, provavelmente de deslocamento mais

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

lento, pode ser um elemento chave na evolução da situação sinótica, já que, junto ao cavado localizado mais para oeste, permite a intensificação dos ventos de noroeste e, consequentemente, o incremento da temperatura e umidade sobre a maior parte do Brasil.

Em síntese, as frentes frias que conduzem a chuvas mais abundantes na RSRJ passam pelo Uruguai 48h antes, onde costumam provocar chuvas pré-frontais sobre o sul do Brasil. Esse sistema está associado a uma onda sinótica relativamente zonal e barotrópica que permite o incremento dos ventos de noroeste sobre grande parte das regiões Sul e Sudeste e, portanto, da instabilidade convectiva. Contudo, a presença de forte instabilidade convectiva não é uma condição necessária para a ocorrência de chuvas volumosas (em termos de acumulados diários) na RSRJ. Nas 48 horas seguintes o sistema avança rapidamente vinculado a uma perturbação sinótica de escala mais curta, fato que sugere um acoplamento entre a onda relativamente barotrópica pré-existente com uma onda mais curta e baroclínica. A presença dessa perturbação provoca a intensificação do sistema frontal, cuja influência alcança latitudes subtropicais mesmo na época mais quente do ano. O maior contraste térmico na baixa troposfera, o aumento da advecção de vorticidade ciclônica nos níveis médios e da divergência nos altos níveis, aliados aos altos teores de umidade nos baixos níveis, são os elementos que explicam a ocorrência de acumulados pluviométricos mais elevados na RSRJ.

Os resultados anteriores contribuirão para a previsão antecipada das frentes frias causadoras de chuvas extremas na Região Serrana do Rio de Janeiro e, portanto, para mitigar seus potenciais efeitos devastadores. Isso será possível a partir da identificação dos padrões discutidos anteriormente nos campos previstos pelos modelos numéricos de previsão de tempo. Um trabalho futuro, atualmente em andamento, será a elaboração de critérios e metodologias objetivas de previsão para este tipo de situação.

## 5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) através do projeto 473149/2012-5.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE K.,. Climatologia e comportamento dos sistemas frontais sobre a América do Sul **Dissertação de Mestrado**. – São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2005, 185 p.; - (INPE-14056-TDI/1067).

BLANCO, C.M.R. Processos de intensificação orográficas da precipitação na Serra do Mar em SP. **Dissertação de Mestrado**. Universidade de São Paul., 1999.

CAVALCANTI I.F., KOUSKY V. **Frentes frias sobre o Brasil. Tempo e Clima no Brasil.** Oficina de Textos, 2009.

DERECZYNSKI, C. P., OLIVEIRA, J. S, MACHADO C. O. Climatologia da Precipitação no Município do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.24, p. 24-38., 2009.

DOLIF, G; NOBRE, C. Improving extreme precipitation forecasts in Rio de Janeiro, Brazil: are synoptic patterns efficient for distinguishing ordinary from heavy rainfall episodes?. **Atmospheric Science Letters**, v. 13, p. 216-222,2012.

EM-DAT – Emergency Events Database. The OFDA/CRED International Disaster Database. Disponível em: http://www.em-dat.be/, 2011.

FOSS M., SELUCHI, M.E., CHOU S. C. Análise climatológica da frequência de frentes frias na América do Sul, **Anais** do XVII Congresso Brasileiro de Metoeorologia, Recife, 2014.

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

LENTERS J.D, COOK K.H. On the Origin of the Bolivian High and Related Circulation Features of the South American Climate. **Jou. Atm. Sci**, 54, 656-676, 1997.

MARCELINO E.V. **Desastres Naturais e Geotecnias**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). São José dos Campos, INPE-15208-PUD/193., 2008.

MAY, W. Simulation of the variability and extremes of daily rainfall during the Indian summer monsoon for present and future times in a global time-slice experiment. **Clim. Dyn**., 22, 183–204., 2004

ROZANTE, J. R.; MOREIRA, D. S.; GONÇALVES, L. G. G.; VILA, D. A. Combining TRMM and Surface Observation Precipitation: Technique and Validation Over South America. **Weather and Forecasting**, v.25, p.885-894., 2010.

SAHA, S., et al. NCEP Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) 6-hourly products, January 1979 to December 2010. Boulder: **Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research**, Computational and Information Systems Laboratory. http://dx.doi.org/10.5065/D69K487J.

SELUCHI, M.E., CHOU, S.C. Synoptic patterns associated with landslide events in the Serra do Mar, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, 2009. DOI 10.1007/s00704-008-0101-x

TEIXEIRA, M. S. SATYAMURTY, P. 2007. Dynamical and synopyghtic characteristics of heavy rainfall episodes in Southern Brazil. **Mon. Wea. Rev**. 135, 598-617.

TOBIN, G. A; MONTZ, B. E. **Natural hazards: explanation and integration**. New York: The Guilford Press. 388p, 1997.

Texto submetido à RBClima em 23/02/2016