



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Um novo olhar para classificação de incursão de ar frio sobre a América do Sul

Julia Amanda Nanini¹; Josefina Moraes Arraut²; Ênio Pereira de Souza³; José Ivaldo Brito⁴ e Enilson Pereira Cavalcanti⁵.

¹ Aluna de doutorado – Universidade Federal de Campina Grande departamento de Ciências Atmosférica, Campina Grande – PB. Brasil. E-mail – julia.amanda@estudante.ufcg.edu.br

² Professora Doutora da Universidade Federal de Campina Grande, departamento de Ciências Atmosférica, Campina Grande – PB. Brasil. E-mail – josefina.arraut@ufcg.edu.br;

³ Professor Doutor da Universidade Federal de Campina Grande, departamento de Ciências Atmosférica, Campina Grande – PB. Brasil. E-mail – enio.souza@ufcg.edu.br;

⁴ Professor Doutor da Universidade Federal de Campina Grande, departamento de Ciências Atmosférica, Campina Grande – PB. Brasil. E-mail – jivaldobrito@gmail.com;

⁵ Professor Doutor da Universidade Federal de Campina Grande, departamento de Ciências Atmosférica, Campina Grande – PB. Brasil. E-mail – enilson.cavalcanti@ufcg.edu.br.

Artigo recebido em 16/01/2024 e aceito em 26/06/2024.

RESUMO

Foram estudados três casos de incursão de ar frio sobre a América do Sul que se desenvolveram em janeiro de 2011 (dois eventos) e abril de 2014 (um evento), com objetivo de investigar as condições termodinâmicas para precipitação através do comportamento vertical da atmosfera com ênfase na umidade, CAPE e CIN. As três incursões são formadas por altas transientes. A precipitação relacionada às incursões de janeiro de 2011 ocorreu em regiões onde a inibição convectiva existe de forma considerável até 800hPa e o mecanismo que possibilita isso é a convergência que promove a ascensão do ar, assim como na incursão de abril de 2014. Essa última durante o seu desenvolvimento avançou para norte, e uma separação da sua nebulosidade possibilitou comparar como as porções se comportaram nas diferentes latitudes. Nos três casos a principal observação foi a diferença do comportamento dos gradientes de umidade e temperatura. O gradiente de temperatura enfraquece já o gradiente de umidade se intensifica quanto atinge aproximadamente 30°S. Conclui-se que as incursões de ar frio são frentes em umidade e em CAPE. Isso porque se observou que existe uma distinção entre as massas de ar tropicais/subtropicais e extratropicais pelos valores de CAPE no campo vertical e horizontal, que acompanha a disposição da umidade. CAPE tem presença intensa a partir de 800 hPa na porção subtropical e mínima em toda a troposfera na massa de ar extratropical, ressaltando que apenas chuva estratiforme é possível nos extratrópicos, já no subtropico existe a possibilidade de disparar chuva convectiva.

Palavras-chave: Incursão de ar frio; magnitude do gradiente de umidade; convecção; inibição convectiva.

A new look at the classification of cold air incursions in South America.

ABSTRACT

Three cases of cold air incursions in South America were studied in January 2011 (two events) and April 2014 (one event), aiming to investigate the thermodynamic conditions for precipitation through the vertical behavior of the atmosphere with emphasis on humidity, CAPE and CIN. The three incursions are formed by high transients. The rains related to the January 2011 incursions occurred in regions where convective inhibition is considerable up to 800hPa and the mechanism that makes this possible is convergence that promotes air rise, as in the April 2014 incursion. Development advanced northward, and the separation of its cloudiness made it possible to compare how portions behaved at different latitudes. In all three cases, the main observation was the difference in the behavior of humidity and temperature gradients. The temperature gradient already weakens and the humidity gradient intensifies as it reaches approximately 30°. It is concluded that the cold air incursions are fronts in humidity and CAPE. This is because it was observed that there is a distinction between tropical/subtropical and extratropical air masses based on CAPE values in the vertical and horizontal field, which follows the disposition of humidity. CAPE has an intense presence from 800 hPa in the subtropical portion and is minimal throughout the troposphere in the extratropical air mass, highlighting that only stratiform rain is possible in the extratropics, while in the subtropics there is the possibility of

triggering convective rain.

Keywords: cold air incursions; Magnitude of the moisture gradient; Convection; Convective inhibition

Introdução

As frentes frias são sistemas que, junto com a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), incurões de ar frios e outros, possibilitam o reajuste de temperatura entre as regiões extratropicais e tropicais do globo Terrestre (Bjerknes, 1919; Ferreira, 2022; Oliveira, 2023; Simões Reboita, et al. 2023). Na América do Sul, impulsionadas pela coincidência de relevo (Gan e Rao, 1994), dinâmica e potencial frontogênico (Satyamurty e Mattos, 1989; Mattos, 2003; Arraut e Barbosa, 2009), as frentes podem chegar até latitudes bem baixas (Kousky, 1979; Cavalcanti e Kousk, 2003), ocorrem durante o ano todo (Taljaard, 1972; Fortune e Kousky, 1983; Siqueria e Machado, 2004), proporcionando, no verão, elevação nos índices de precipitação por onde se estabelecem (Garreaud e Wallace, 1998; Ferreira e Reboita, 2022; do Carmo, 2023), destacando o sul e sudeste do Brasil (Seluchi et al., 2017; da Rocha, 2024; Oliveira, et al. 2024; Segura, et al. 2024) e também quedas bruscas de temperatura quando atingem a Amazônia no inverno, configurando o estado de friagem (Parmenter, 1976; Fortune e Kousky, 1983; Marengo e Nobre, 1997a; Marengo et al., 1997b; Garreaud, 2000; Capucin, et al., 2022; Antonucci, et al. 2023;) e estabelecimento de geadas no sul e sudeste, influenciando na economia local, como apontado em Reis (et al. 2022), Alves (et al. 2024) e Modernel (2024). As frentes frias e incursões de ar frio podem ser classificadas perante seu potencial movimentação meridional, movimentação para leste, intensidade e duração (Lupo et al., 2001, Lanfredi e Camargo, 2018).

Em Garreaud e Wallace (1998) são estudadas o desenvolvimento das massas de ar frio e Garreaud (2000) descreve desde a fase preliminar, que acontece com a acentuação da Baixa do Noroeste da Argentina (BNOA) (Seluchi e Garreaud, 2012), até seu estágio maduro, e parecem se comportar como uma frente fria, porém diferem em tempo de avanço e formação de gradiente de temperatura. Nas incursões não se formam os padrões de zona frontal, as mudanças de temperatura e densidade das massas de ar são amenizadas pelo deslocamento lento, que propicia uma homogeneização das características durante o tempo (Garreaud, 2000).

Sanders e Hoffman (2002), numa análise de zonas baroclínicas na América do Norte observaram que cerca da metade de casos classificados pelo

NCEP (National Centers for Environmental Prediction) como frentes frias durante três meses de verão não estavam associados a definição clássicas vista em Bjerknes (1919) e Bluestein (1992), principalmente em padrões de vento, temperatura e umidade.

As diferenças entre frente fria “real” e cavado baroclínico (ou ainda frente subtropical) foram estabelecidas em Sanders (2005): como mudança da direção do vento e uma região de baixa pressão, mudança de temperatura dentro de um dia e podem ser diferenciadas por não apresentar um jato polar associado, fraco gradiente de temperatura e pressão, presença tanto de intenso gradiente de água precipitável e de temperatura potencial equivalente em níveis de 850hPa. Em Sanders e Doswell III (1995), Sanders e Kessler (1999), Sanders e Hoffman (2002) e Sanders (2005) os autores chamaram a atenção para a necessidade de uma melhor análise das informações de superfície levando em consideração principalmente aspectos sinóticos e termodinâmicos, que possivelmente ajudariam na melhor classificação dos sistemas, refletindo na previsão e análise do tempo.

Ressalta-se que Escobar et al. (2019) realizaram uma climatologia de incursões fria na América do Sul observaram que assim como as frentes subtropicais, as incursões frias não apresentam características fortes de gradiente de temperatura entre as massas de ar e seu deslocamento é mais fraco e lento, muitas vezes avançando em direção ao Atlântico subtropical mais que para as latitudes tropicais sobre o continente.

As incurões de ar frio se mostram com características únicas que devem ser melhor exploradas. A falta de um forçamento termico proporcionado pelo gradiente frontal de temperatura para a geração de instabilidade atmosférica mostra que outras características devem fazer o papel, como a umidade e as condições de Energia Potencial Disponível convectiva (CAPE) e de Inibição Convectiva (CIN).

CAPE e CIN, cominados com outros parametros convectivos, são comumente utilizados para determinar eventos extremos de convecção que evoluem podendo chegar em tempestade severas, como visto em trabalho como Andreolina (et al. 2022) da Rocha Bartolomei (et al.2023) e outros. A complexidade de informação que CAPE e CIN carrega (Emanuel, 2023) pode também ser utilizada para caracterizar sistemas e eventos melhorando o

endowment geral da dinâmica e termodinâmica associado, tanto no campo horizontal superficial da atmosfera como no camada vertical.

Aproveitando a disponibilidade atual de dados de reanálise ERA5, não só de superfície como também de variáveis integradas na vertical, este estudo investiga três casos de incursão de ar frio

Material e métodos

Dados e metodologia

Foram utilizados dados de reanálise ERA5 do banco de dados European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF, <https://www.ecmwf.int/>) e conjuntos de dados de precipitação como o Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM, <https://pmm.nasa.gov/trmm>) para os períodos de 7 a 10 e 19 a 21 de janeiro de 2011 e 7 e 9 de abril de 2014, com a resolução de grade de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$.

Os dados foram de vorticidade potencial, altura geopotencial em 925hPa, temperatura, umidade específica, umidade relativa, velocidade vertical, CAPE, precipitação, e as componentes zonal (u) e meridional (v) do vento. Para as análises foi necessário observar os campos horizontais dessas variáveis e de frontogênese, seguindo Ninomiya (1984), intensidade de gradiente de temperatura e umidade.

Já para os perfis verticais foram calculadas: perfil de temperatura potencial (θ), perfil de temperatura potencial equivalente (θ_e), perfil de temperatura potencial equivalente de saturação, todos a partir de Bolton (1980) e perfil de velocidade vertical e meridional do vento. Esses perfis trazem as informações de condições verticais locais de resistência para a convecção: instabilidade e estabilidade da atmosfera, movimento vertical do vento e coluna de umidade são as principais delas.

Para completar a análise vertical de instabilidade um diagrama de projeção da região que contém Energia Potencial Convectiva Disponível (CAPE) e Inibição Convectiva (CIN) assim como sua intensidade, foi calculado. Esses parâmetros são geralmente utilizados em nowcasting e definição de tempestades (Blanchard, 1998; Silva Dias, 2000; Riemann-Campe, 2010). Aqui uma subtração entre θ_e no nível de 1000 hPa e θ_{es} de todos os níveis de pressão, mostra como se comporta a camada atmosférica. Regiões positivas aparecem onde não existe inibição e valores negativos onde a inibição é presente, os valores mostram a intensidade com que acontece a condição convectiva.

sobre a América do Sul, que se estendem e avançam entre o subtropical e trópico. O objetivo é entender como se comportou o sistema ao longo de sua evolução, na dinâmica e na termodinâmica e sua produção de precipitação. Espera-se identificar padrões frontais de umidade e de energia convectiva, que caracterize esses eventos.

Os perfis foram feitos na localidade e horário de máxima precipitação dentro do período de desenvolvimento dos sistemas. As longitudes escolhidas foram para os perfis foram 62°W para as incursões de janeiro de 2011 e 58°W para as duas porções da incursão de abril de 2014. Detalhes desta metodologia são apresentados na próxima seção.

Por organização alguns campos foram analisados porém não mostrados. Apenas o de precipitação, convergência, CAPE, e frontogênese e de cobertura de nuvem estão dispostos no presente texto, e também os perfis produzidos.

Eventos de estudo

Os três eventos se desenvolveram no sul da América do Sul. A primeira incursão analisada ocorreu entre os dias 7 e 10 de janeiro de 2011 (Evento 1), foi causada pela passagem de uma alta transiente e apresenta um ciclo diurno muito forte, porém em todo o período analisado a massa de ar tropical sempre se manteve mais quente e úmida que a extratropical. A incursão de ar extratropical rumo a latitudes mais baixas começa por volta de 18Z do dia 7, o escoamento com componente de norte, a leste dos Andes, transportando a massa de ar mais úmido, atingindo 30°S , ganhando força 12 horas depois. A chuva associada à incursão tem início em 18Z do dia 08, as imagens de satélite mostram a nebulosidade (Figura 1), e atinge seu máximo às 06Z do dia 10.

A segunda incursão ocorreu entre os dias 19 e 21 de janeiro de 2011 (Evento 2) e foi causada pela incursão de Garreaud (2000). A massa de ar subtropical apresenta temperaturas acima de 30°C pela interação de uma alta transiente que acumulou ar nos Andes evoluindo seguindo o modelo de e segue bastante úmida assim como a massa de ar Amazônica. À medida que a incursão avança a fronteira entre as massas de ar subtropical e extratropical recua para norte. O campo de geopotencial mostra a Baixa do Noroeste da Argentina bastante intensificada durante todo o evento. A precipitação relacionada à incursão aparece no dia 19 e às 06Z do dia 20 atinge o máximo, é possível ver a nebulosidade associada nas imagens de satélite (Figura 2).

Finalmente, a terceira incursão investigada esteve presente entre os dias 07 e 10 de abril de 2014 (Evento 3), se desenvolveu uma nebulosidade em formato de vírgula que se pode ver entre 45° e 25°S nas imagens de satélite na figura 3. Essa nebulosidade existe em uma região bastante extensa, porem mesmo que esteja acoplada, pode ser dividida em duas porções, a subtropical (aproximadamente entre 35° e 25°S) e a extratropical (aproximadamente entre 45° e 35°S). Olhando os valores de topo de nuvem, a porção subtropical parece ser mais chuvosa, com um máximo as 06Z do dia 08, entre 58°O e 35°S.

O primeiro é um ciclone extratropical que se forma sob a América do Sul a partir das 00Z de 08 entre aproximadamente 37° e 42°S, e que se intensifica nos horários seguintes. Durante essa fase provoca uma incursão de ar frio, que adentra o continente até aproximadamente 35°S e 60°O, e é

enfraquecida à medida que a circulação ciclônica avança para leste ao passar do tempo. A incursão proporciona o encontro da massa extratropical, mais seca e fria, com a massa mais quente e úmida que vem de norte. Esse sistema é responsável pela nebulosidade de porção extratropical.

O outro sistema atuante na formação da nebulosidade estudada, agora em relação à porção subtropical, é a alta transiente a noroeste do ciclone extratropical, possibilitando a incursão de ar frio aos moldes de Garreaud (2000), que avança a nordeste até aproximadamente 25°S. Um dia antes da incursão a Baixa do Noroeste da Argentina está bastante intensa, auxiliando no transporte de ar Amazônico para o sul, que alimenta os subtópicos (Sálio et al., 2002; Arraut, 2008) e proporciona condições de precipitação quando encontra a massa de ar mais seca e fria.

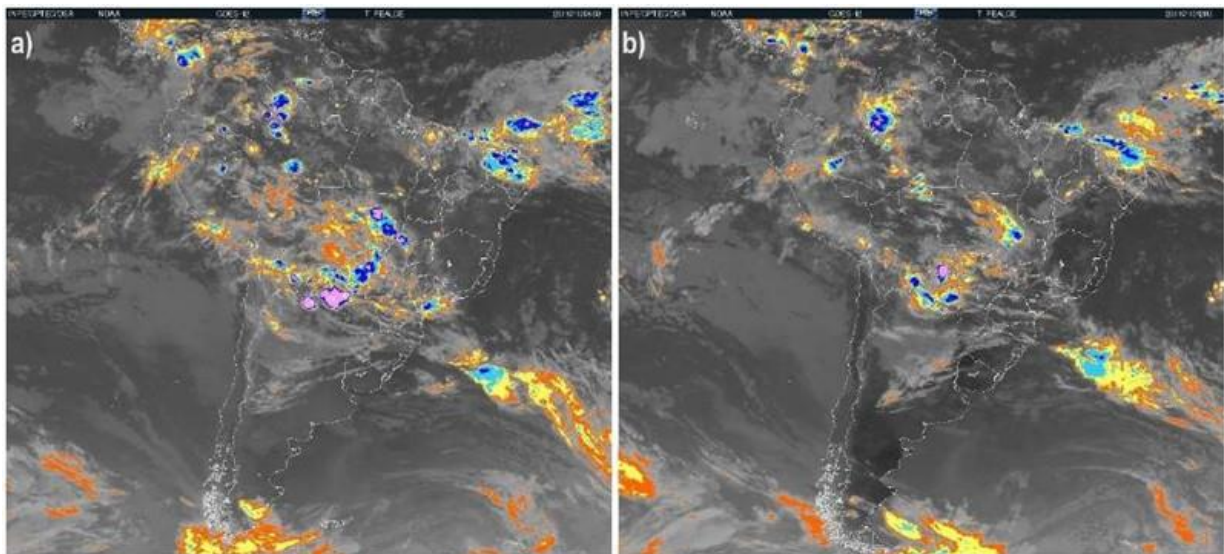


Figura 1. Satélite, temperatura de topo de nuvem. A) 06 e B) 12 Z de 10 de janeiro de 2011. Fonte: INPE/CPTEC.

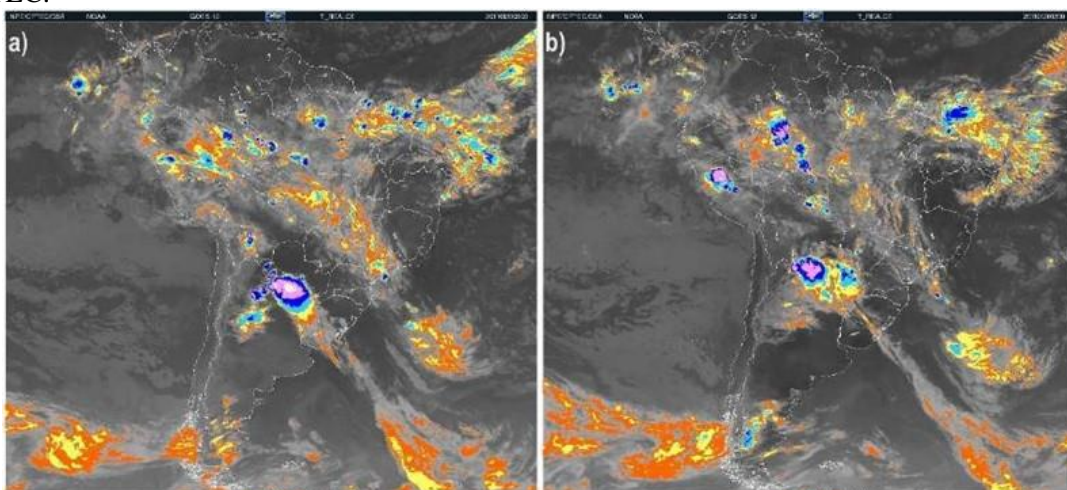


Figura 2. Satélite, temperatura de topo de nuvem, A) 06 e B) 12 Z de 20 de janeiro de 2021. Fonte:

INPE/CPTEC.

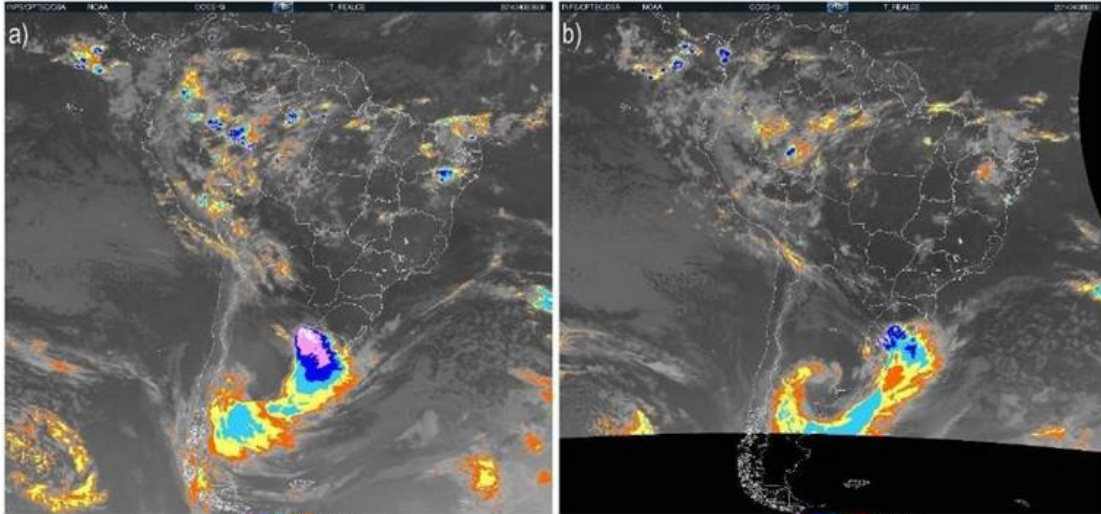


Figura 3. Satélite, temperatura de topo d nuvem. A) 06 e B) 12 Z de 08 de abril de 2011. Fonte: INPE/CPTEC.

Resultados e discussões

Evento 1

A incursão que ocorreu entre os dias 07 e 10 de janeiro de 2011 se desenvolve entre as latitudes de 40°S e 20°S e apresenta valores de frontogênese que não passam de 35 K/(100km*dia). Ela ganha força dia 9, quando o módulo do gradiente de temperatura, em alguns pequenas regiões, é maior que 4°C/100km (figura 4 c). Nesse momento o campo horizontal de umidade mostra a massa de ar seca apresentando umidade de 9g/kg e a massa de ar úmida já atinge 16g/kg. As 12Z do dia 9 a incursão atinge os subtópicos, aproximadamente 30°S.

Para esse evento os perfis analisados foram feitos em 62°W às 06Z do dia 10, local onde intersecta o máximo local da chuva associada à incursão. Essa precipitação tem início as 18Z do dia 7, e se desloca para nordeste, atingindo seu máximo à frente do gradiente de umidade, que também tem maior valor significativo. Existe importante diferença entre o comportamento da magnitude dos gradientes (Figura 4) no campo de temperatura de umidade. No campo de temperatura os seus valores são mais expressivos no início da incursão, quando ainda se localizava mais ao sul, e diminui progressivamente à medida que caminha para as latitudes tropicais.

As 06Z do dia 8, o módulo do gradiente de temperatura supera 4°C/100km, na latitude de aproximadamente 39°S (Figura 4a). Com o avanço para o norte, esse valor passa a ser 3°C/100km em

31°S. Se contrapondo, o valor do módulo do gradiente de umidade.

A partir de 18Z do dia 9 o gradiente de umidade específica chega ser superior a 0,0025 g/(kg/100km) (Figura 4 d), e se mantém intensificando nos horários seguintes e supera o valor de 0,004 g/(kg/100km) (Figura 4 f) por volta das 12Z do dia 10 na latitude de 26°S. Esses valores são bastante expressivos no campo de gradiente, causando grande perturbação e configura uma condição de frente em umidade. O perfil de umidade relativa (Figura 5b) mostra que o avanço da massa de ar dos extras trópicos resulta na intensificação do gradiente de umidade.

O perfil de θ (Figura 5 a) é bastante estável em toda a extensão mostrada, porém e de θ_e (Figura 5 c) mostra a fronteira da incursão entre 30 e 25°S.

Nessa localidade o perfil se apresenta neutro. A partir de 35°S nos níveis entre 1000 e 200 hPa existe estabilidade (Figura 5 c). As condições convectivas separam muito bem os extras trópicos e os subtópicos, isso pode ser visto por vários horários durante a evolução do evento, as 06Z do dia 10 em 62°O (Figura 5 d) existe CAPE apenas na porção subtropical e tropical a partir de 800hPa. Toda a camada atmosférica a partir de 27°S está inibida. Entre 15 e 20°S, mesmo tento CAPE a partir de 800hPa, CIN chega -40. A convergência do vento (Figura 6) é o mecanismo responsável que promove a ascensão do ar na região, vencendo a inibição convectiva nos baixos níveis (Figura 5 d).

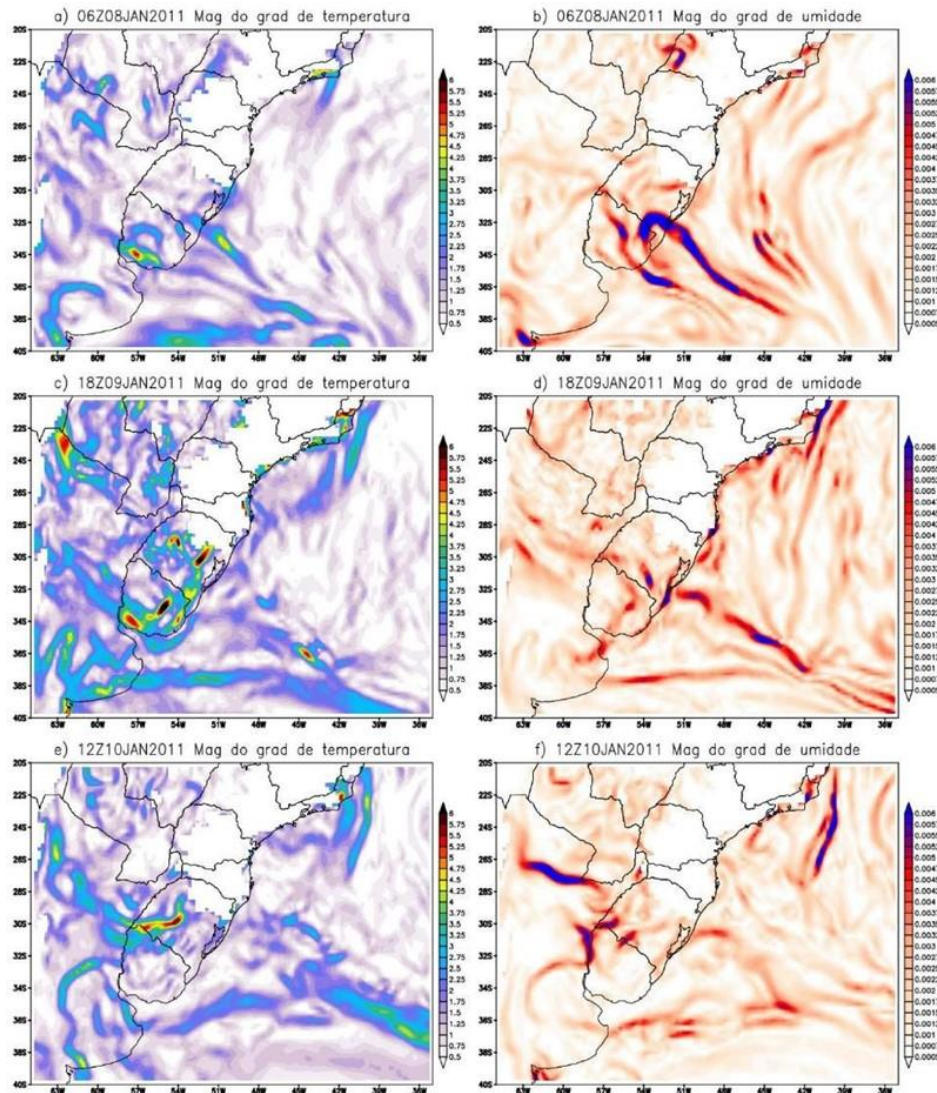


Figura 4. A) C) e E) Magnitude do gradiente de temperatura em $^{\circ}\text{C}/100\text{km}$ e B) D) e F) magnitude do gradiente de umidade em $\text{g}/\text{Kg} \cdot 100\text{km}$. Em 925 hPa. Para os horários selecionados.

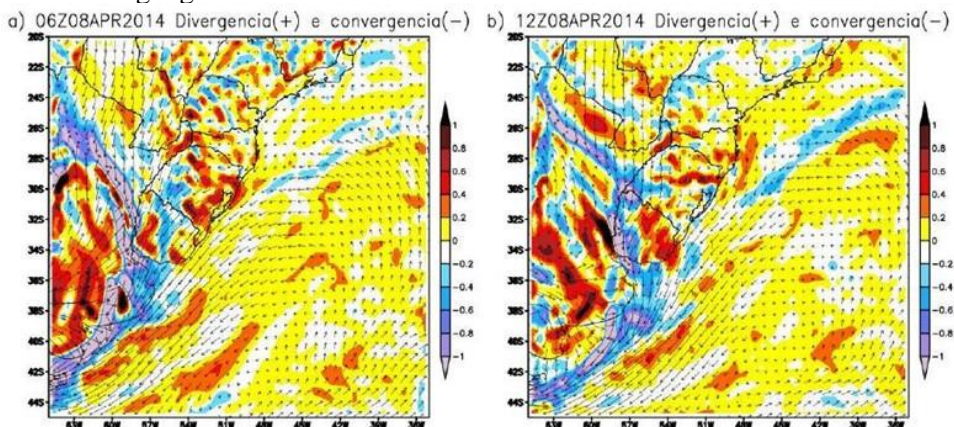


Figura 5. A) Perfil de 0 B) perfil de umidade específica e movimento do vento em m/s (setas). C) perfil de 0 e D) Perfil de CAPE e CINE, todos para a longitude de 62° O para 06Z de 10/01/2011.

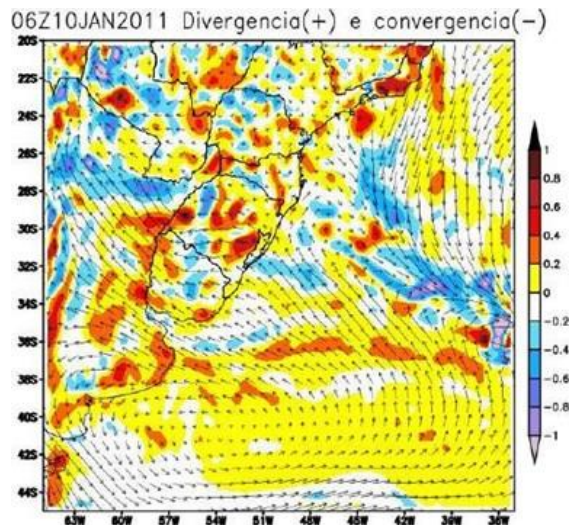


Figura 6. Convergência do vento em 925hPa às 06Z do dia 10 de Janeiro de 2011.

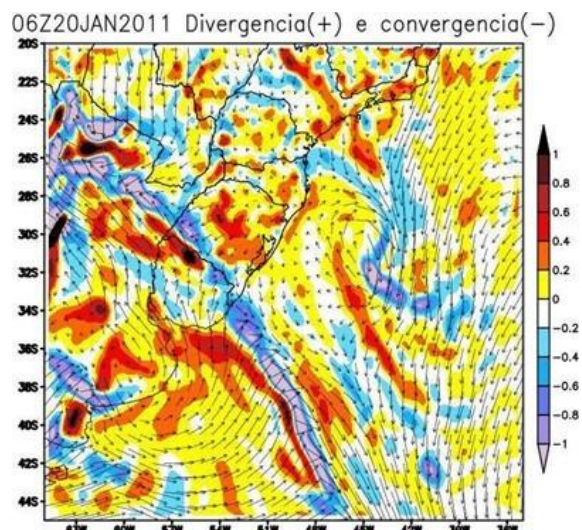


Figura 7. Convergência do vento em 925hPa às 06Z do dia 10 de Janeiro de 2011.

Evento 2

No evento que ocorreu de 19 a 21 de Janeiro de 2011, nos horários mais quentes a massa de ar entre 42 e 20°S apresenta valores maiores que 30°C, com uma diferença de 10°C quando se diz respeito a massa de ar sobre a Amazônia. Já em relação ao campo de umidade as massas de ar apresentam ser semelhantes.

A precipitação gerada pela incursão começa por volta de 06Z do dia 19, e 24 horas depois atinge seu máximo (40mm) aproximadamente na latitude de 30°S. Nesse momento é possível observar a convergência (Figura 7) do vento vencendo a CIN em uma localidade onde quase não tem CAPE, isso pode ser visto no diagrama (Figura 8d). As 18Z do dia 20 a precipitação está a norte de incursão (não mostrado).

Os perfis verticais foram feitos em 06Z do

dia 20, na longitude de 62°O. O perfil de temperatura potencial (Figura 8 a) mostra uma atmosfera estável entre 22°S e 26°S. Já o perfil de temperatura potencial equivalente mostra que onde a chuva está localizada existe instabilidade potencial na camada, por volta do 27°S (Figura 8 c).

O perfil de umidade e movimento vertical do vento (Figura 8 b) mostra que latitudes ao sul de 35°S apresentam umidade baixa em todos os níveis e há vento subsidentes, já para as latitudes inferiores a 30°S é garantido umidade até 700 hPa, com vento ascendente e turbulento onde se concentra a precipitação. É possível ver uma fronteira entre as latitudes que apresentam CAPE e latitudes que não apresentam (Figura 8d). Claramente entre 30°S e 25°S inibição convectiva quase não aparece, sendo bem mais expressiva nas latitudes fora desse intervalo (Figura 8d).

A frontogênese (não mostrada) sobre o continente as 12Z do dia 20 entre as latitudes de 30 e 40°S perde a força, não ultrapassando 5 K/(100km*dia). O módulo do gradiente de temperatura é de aproximadamente 6°C/100km as 18Z do dia 19 (Figura 9 a) e as 06Z do dia 20 se enfraquece (Figura 9 c), e assim segue conforme a incursão de desloca para nordeste, e em 00Z do dia 21 é quase imperceptível (Figura 9 e). Já o módulo do gradiente de umidade atinge um máximo entre 30° e 33°S em 18Z do dia 19, segue com essa intensidade nas 12 horas seguintes (Figura 9 b, d), com o valor de 0,0060 g/(kg/100km).

Assim como no primeiro evento, o comportamento dos módulos de gradiente de temperatura e umidade, diminuindo e aumentando, respectivamente, à medida que a incursão avança é mantido (Figura 9).

Evento 3

Para o evento que ocorreu do dia 07 a 09 de abril de 2014, foram elaborados os perfis para dois horários distintos, as 06Z e as 12Z do dia 8, com o corte longitudinal em 58°W

O comportamento de se mantém estável/neutro (Figura 10 a), entre 30°S e 40°S, inclusive nos horários de precipitação máxima. O θ_e altera em condições de neutralidade e instabilidade. Acompanha muito bem o perfil de umidade e quando a nebulosidade se separa cria-se duas regiões de características bem distintas (Figura 11 c). A região mais subtropical (30°S) é neutra até aproximadamente 750 hPa e a região extratropical (superior a 40°S) que se mantém neutra entre 40 e 35°S até aproximadamente 850hPa, com um bolsão de ar frio entre que se

estende até 650hPa, no perfil de umidade é possível ver também mostrando uma região bem mais seca (Figura 10 b) que latitudes subtropicais. No horário seguinte o bolsão frio e seco chega mais próximo à superfície (Figura 11 b), em 35°S a atmosfera fica absolutamente instável até 800hPa. A umidade se concentra até 750hPa (Figura 10 e 11 b), sendo máxima entre 20°S e 5°N até 900hPa. Essa umidade acompanha o movimento da nebulosidade. A aparição do bolsão de ar seco intensificado em 12Z do dia 08 (Figura 11 b) marca o início da separação das massas de nebulosidade entre subtropical e extratropical, sendo a última mais seca, diminuindo ainda mais a umidade com o tempo, possivelmente pelo movimento subsidente. A porção subtropical se mantém úmida e com movimentos ascendentes muito fortes, entre 30 e 25°S.

Existe umidade até 700hPa em 40°S e a sul disso diminui drasticamente (Figura 11 b). A partir de aproximadamente 37°S não existe CAPE em nenhum nível, durante todo o período observado (Figura 10 e 11 d), e existe uma fronteira de CAPE e CIN avança para norte, com o passar do tempo, que pode ser observado nas mesmas figuras.

No horário que ocorre precipitação, em 58°O e que coincide com o máximo da convergência (34 e 37°S) (Figura 12), existe CAPE a partir de 720hPa, com inibição convectiva alta em 1000hPa, praticamente entre 37°S e a linha do Equador (Figura 10 e 11 e). À medida que a umidade avança com a frente a fronteira de CAPE e CIN avança também, atingindo a latitude mínima de 25°S.

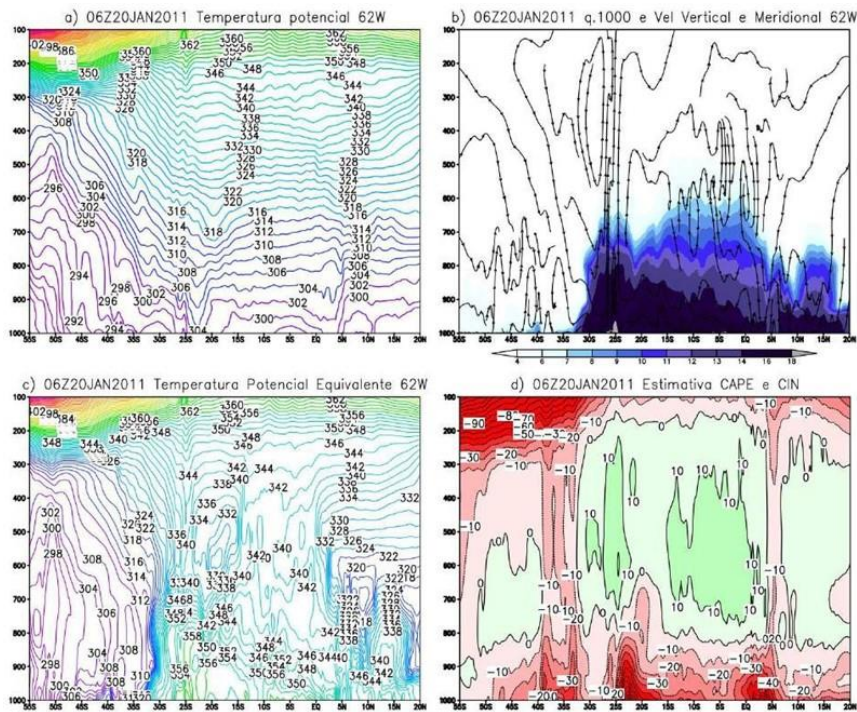


Figura 8) A) Perfil de 0 B) perfil de umidade específica e movimento do vento em m/s (setas). C) perfil de 0 e D) Perfil de CAPE e CINE, todos para a longitude de 65° O às 06Z do dia 20/01/2011.

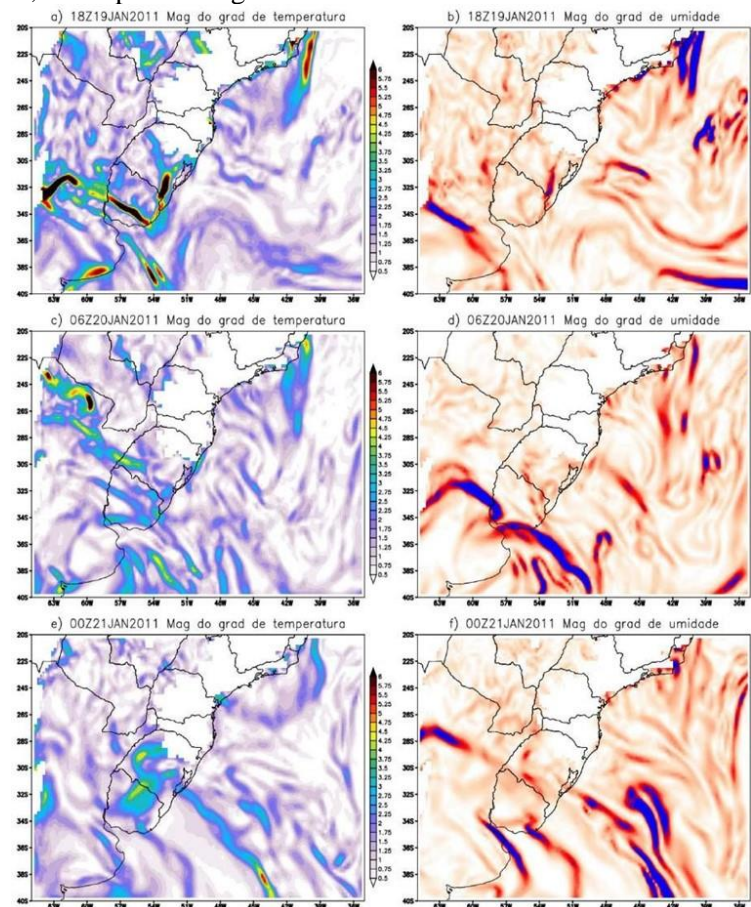


Figura 9. A) C) e E) Magnitude do gradiente de temperatura em °C/100km e B) D) e F) magnitude do gradiente de umidade em g/Kg* 100km. Em 925 hPa. Para os horários selecionados.

A convergência do vento acompanha perfil de umidade, em 06Z do dia 08 (Figura 12 a) ela é

máxima entre 30°S e 40°S, em 12Z do dia 08 (Figura 12 c) ela se divide e fica relativamente mais

intensa entre 40°S e 45°S e menos entre 35°S e 25°S, existe movimento subsidente nessa região (Figura 10 e 11 b). Em 00Z do dia 09 existe um núcleo de convergência entre 37°S e 45°S e 54°O e 58°O (Figura 12 d), que avança para o oceano antes de perder força. Pode-se concluir que a convergência está ligada com a umidificação do ar. Observando os mapas de magnitude do gradiente de temperatura (Figura 13 a, c, e, e f), existe uma região bem forte, que começa em 18Z do 07 (não mostrado) em 35°S e que se intensifica ainda mais em 06Z do dia 08 (Figura 13 a).

Já em relação à magnitude do gradiente de umidade (Figura 13 b, d, f) é possível ver: à medida que o gradiente de temperatura existe em 30°S e 63°O o gradiente de umidade também surge na mesma localidade (Figura 13). Em 18Z

do dia 08 ambos avançam (Figura 13 c e d), e se mantem bastante intenso até 24°S. O gradiente de temperatura se dissipa, perdendo intensidade (Figura 13 e), em 06Z do dia 09, o gradiente de umidade (Figura 13 f) avança para leste, o gradiente de temperatura já não existe com intensidade. O gradiente de umidade só começa a se dissipar em 00Z do dia 10 (não mostrado).

O mapa de CAPE (Figura 14) mostra que o máximo de convergência (Figura 12) se encontra numa região de máximo de CAPE. A partir do dia 06Z do dia 08 o CAPE avança para norte. A fronteira do CAPE visto no perfil (Figura 10 e 11 b) e no mapa acompanha também a frente em umidade, com seu máximo coincidindo quase que fielmente.

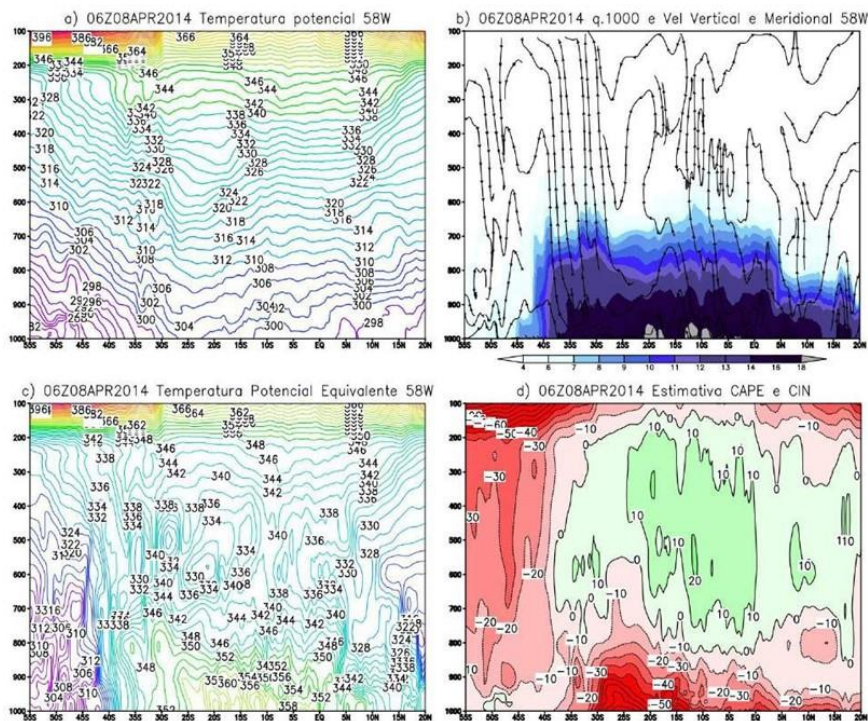


Figura 10. A) Perfil de 0 B) perfil de umidade específica e movimento do vento em m/s (setas). C) perfil de 0 e D) perfil de CAPE e CINE, todos para a longitude todos para a longitude de 58°O, e para 06Z do dia 08/04/20214.

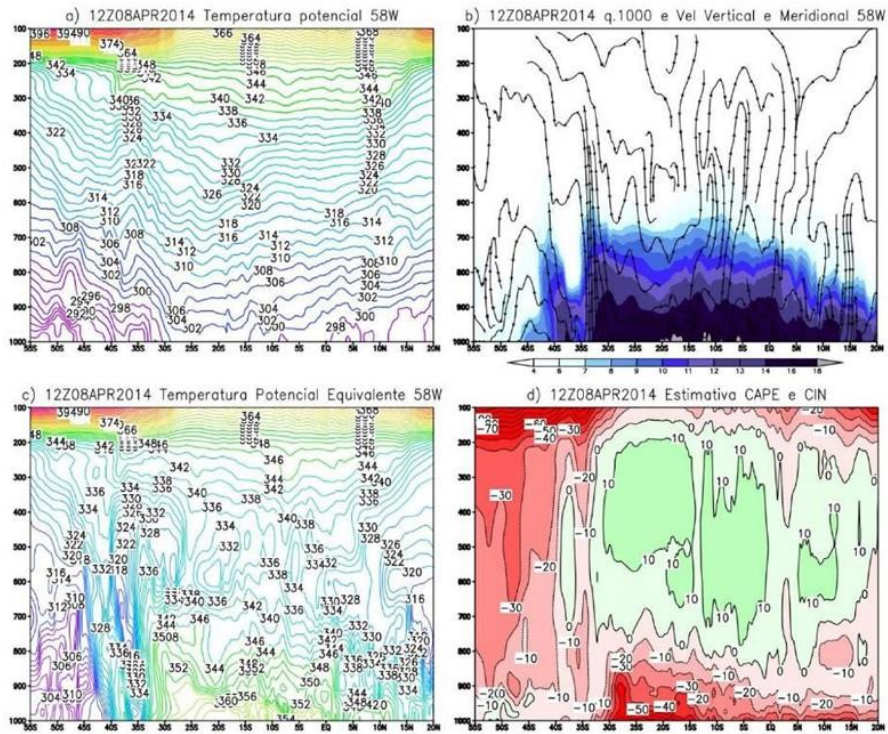


Figura 11: a) Perfil de θ b) perfil de umidade específica e movimento do vento em m/s (setas). c) perfil de θ_e d) Perfil de CAPE e CINE, todos para a longitude todos para a longitude de 58°O , e para 12Z do dia 08/04/2014. Fonte: Autores. Figura 11: a) Perfil de θ b) perfil de umidade específica e movimento do vento em m/s (setas). c) perfil de θ_e d) Perfil de CAPE e CINE, todos para a longitude todos para a longitude de 58°O , e para 12Z do dia 08/04/2014.

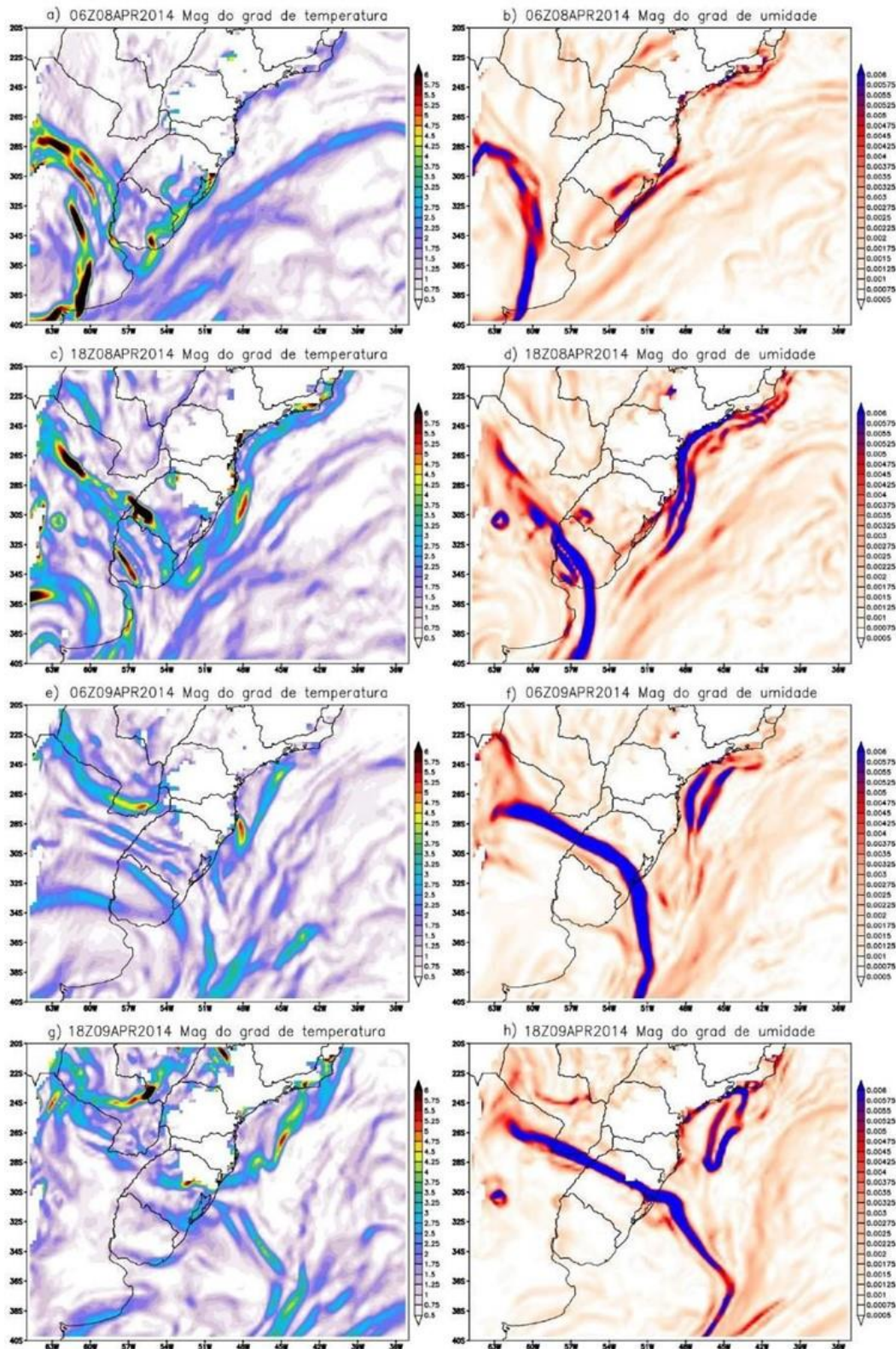


Figura 12: Convergência e divergência do vento, para 950hPA, a) 06Z e b) 06Z de 8 abril de 2014 .
 Figura 13: a) c) e) e g) Magnitude do gradiente de temperatura em °C/100km e b) d) f) e h) magnitude do gradiente de umidade em g/Kg*100km. Em 925 hPa. Para os horários seleccionados.

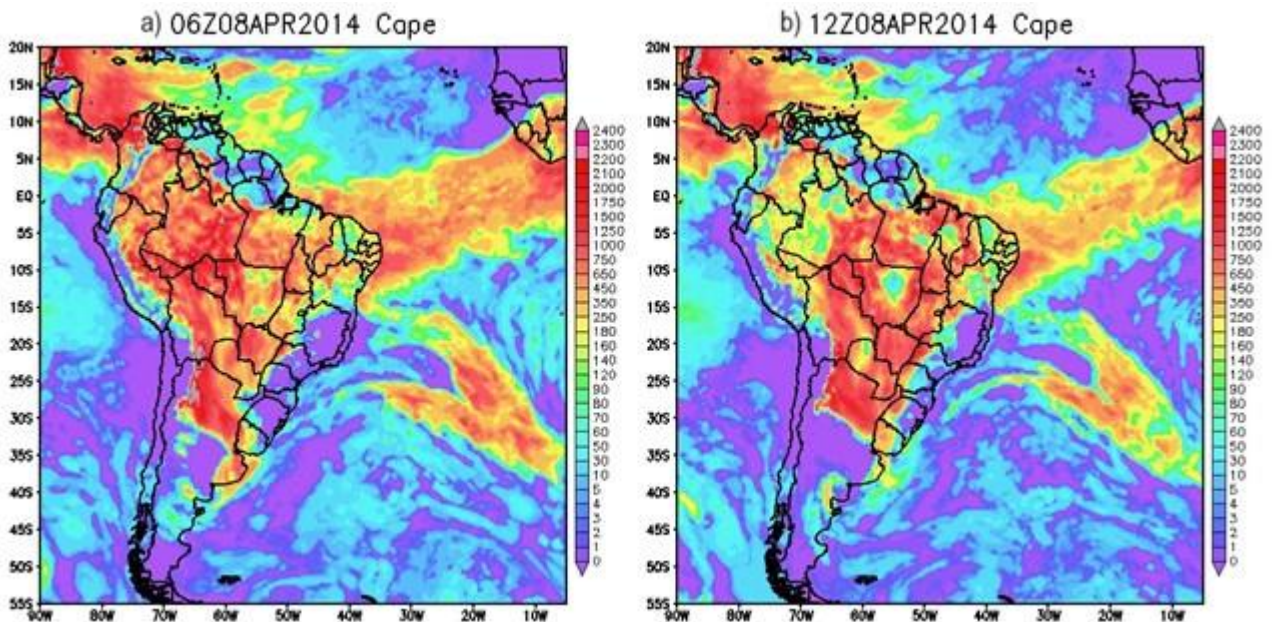


Figura 14: Campo horizontal de CAPE (J/Kg) a) 06Z e b) 06Z 8 de abril de 2014.

Conclusões

Com a análise feita foi possível, principalmente, constatar nos três eventos, e mais fortemente no evento 3, a diferença de comportamento entre a intensidade dos gradientes de temperatura e de umidade. Quando os eventos atingem os subtropicais (~30°S) o gradiente de temperatura enfraquece e o de umidade se intensifica. Sugere-se então pensar essas incursões como frentes em umidade. Mostram também que os movimentos horizontais do ar em escala sinótica alteram a distribuição da instabilidade na mesoescala e na

escala subsinótica. A advecção da massa de ar tropical para o sul e a convergência de transporte de umidade integrado na vertical dita a distribuição da instabilidade nos subtropicais e extratropicais.

Uma divisa entre a porção subtropical e extratropical existe quando se diz respeito ao CAPE, isso é identificável nos perfis verticais nos

Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade Federal de Campina Grande, a Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas e a CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pelo auxílio financeiro.

três eventos. A conclusão é que essas incursões também apresentam características frontais em CAPE, acompanhando muito bem o comportamento da umidade.

No subtropicais existem valores altos em CIN apenas nos baixos níveis, até aproximadamente 800hPa. Esse padrão muda para a extratropical, onde os valores de CIN são moderados em toda a troposfera e sem a presença de CAPE. Evidenciando que a chuva produzida em latitudes maiores que 30°S são estratiformes e que a possibilidade de chuva convectiva fica apenas para as regiões subtropicais e tropicais. Estudos extensivos nesse sentido devem ser realizados.

A sugestão para futuros trabalhos é aplicar o número de casos observados para definir de fato uma nova classificação. Sempre levando em consideração os dados mais atuais disponibilizados pela reanálise.

Referências

- Andrelina, B., Reboita, M. S., Capucin, B. C., Mattos, E. V., da Costa, L. H., Enoré, D. P., & Biscaro, T. S. (2022). Características do evento convectivo ocorrido em Santa Rita do Sapucaí-MG em outubro de 2019. *Ciência e Natura*, 44, e46-e46. DOI: 10.5902/2179460X65529
- Alves, L. Q., da Silva, A. B., Putti, F. F., & Góes, B. C. (2024). Danos na cultura do café causado pelas geadas ocorridas no ano de 2021 nos municípios de Alfenas e Poços de Caldas, Brasil. *Peer Review*, 6(9), 1-15. DOI: <https://doi.org/10.53660/PRW-2117-3911>
- Antonucci, B., Barbino, G. C., de Andrade, N. L. R., & Webler, A. D. (2023). Efeito de um evento de friagem no cenário de mudança no uso e cobertura da terra no Sudoeste da Amazônia. *Revista Brasileira de Climatologia*, 33, 149-168. DOI: <https://doi.org/10.55761/abclima.v33i19.16675>
- Arraut, J. M., & Barbosa, H. M. J. (2009). Large scale features associated with strong frontogenesis in equivalent potential temperature in the South American subtropics east of the Andes. *Advances in Geosciences*, 22, 73-78. DOI: <https://doi.org/10.5194/adgeo-22-73-2009>
- Bjerknes, J. (1919). On the structure of moving cyclones. *Monthly Weather Review*, 95-99. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1919\)47<95:OTSOMC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1919)47<95:OTSOMC>2.0.CO;2)
- Blanchard, D. O. (1998) Assessing the vertical distribution of Caonvective available potential energy. *Weather and Forecasting*, 13, 870-877. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1998\)013<0870:ATVDOC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1998)013<0870:ATVDOC>2.0.CO;2)
- Bluestein, H. B. (1992). Synoptic-dynamic meteorology in midlatitudes. *New York: Oxford University Press*.
- Bolton, D. (1980). The Computation of Equivalent Potential Temperature. *Monthly Weather Review*, 108, 1046-1053.
- do Carmo, E. L. I., Reboita, M. S., & Marques, R. (2023). Evolução Temporal das Variáveis Atmosféricas associadas a Casos de Frentes Frias Fortes em Cuiabá, MT, entre 1996 e 2015. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 16(1), 145-154. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.1.p145-154>
- Capucin, B. C., Reboita, M. S., Lucyrio, V., & Escobar, G. C. J. (2022). Onda de Frio Histórica no Brasil: um Estudo de Caso de Junho de 1985. *Anuário do Instituto de Geociências*, 45, 1-13. DOI: https://doi.org/10.11137/1982-3908_2022_45_40761
- Cavalcanti, I.F.A., & Kousky V. E., (2003). Climatology of South American cold fronts. VII International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography, Wellington New Zealand.
- Escobar, G. C. J., Reboita, M. S., & Souza, A., (2019). Climatology of surface baroclinic zones in the coast of Brazil. *Atmósfera*, 32(2), 129-141. DOI: <https://doi.org/10.20937/ATM.2019.32.02.04>
- Emanuel, K. (2023). On the Physics of High CAPE. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 80(11), 2669-2683. DOI: <https://doi.org/10.1175/JAS-D-23-0060.1>
- Ferreira, Nelson Jesuz; de Albuquerque Cavalcanti, Iracema Fonseca. (2022) Sistemas meteorológicos atuantes no Brasil. Oficina de Textos.
- Fortune, M. A., & Kousky, V. (1983). Two Severe Freezes in Brazil: Precursors and Synoptic Evolution. *Monthly Weather Review*, v. 111, 181-196. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1983\)111<0181:TSFIBP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1983)111<0181:TSFIBP>2.0.CO;2)
- Garreaud, R. D., & Wallace, J. M. (1998). Summertime Incursions of Midlatitude Air into Subtropical and Tropical. *Monthly Weather Review*, v. 126, 2713-2733. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1998\)126<2713:SIOMAI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1998)126<2713:SIOMAI>2.0.CO;2)
- Garreaud, R. D. (2000). Cold Air Incursions over Subtropical South America: Mean Structure and Dynamics. *Monthly Weather Review*, v. 128, 2544-2559. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2000\)128<2544:CAIOSS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2000)128<2544:CAIOSS>2.0.CO;2)
- Gan, M. A., & Rao, V. B. (1994). The Influence of the Andes Cordillera on Transient Disturbances. *Monthly Weather Review*, 122(6), 1141-1157. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1994\)122<1141:TIOTAC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1994)122<1141:TIOTAC>2.0.CO;2)
- Kousky, V. E. (1979). Frontal influences on northeast Brazil. *Monthly Weather Review*, v. 107, 1142-1153. DOI: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(1979\)107<1140:FIONB>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1979)107<1140:FIONB>2.0.CO;2)
- Lanfredi, I. S., & e de Camargo, R.. (2018). Classification of Extreme Cold Incursions over South America. *Weather and Forecasting*, 33(5) 1183- 1203. DOI: <https://doi.org/10.1175/WAF-D-17-0159.1>
- Lupo, A. R., Nocera, J. J., Bosart, L. F., Hoffman, E. G., & Knight, D. J. (2001). South American Cold Surges: Types, Composites, and Case

- Studies. *Monthly Weather Review*, 129(5), 1021-1041. Disponível em: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2001\)129<1021:SACSTC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2001)129<1021:SACSTC>2.0.CO;2). Acesso em: 18 de dezembro de 2023.
- Mattos, L. F. (2003). *Frontogênese na América do Sul e precursores de friagem no estado de São Paulo*. 2003. 213 p. Tese Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2003.
- Marengo, J., Cornejo, A., Satyamurty, P., Nobre, C., & Sea, W. (1997b). Cold Surges in Tropical and Extratropical South America: The Strong Event in June 1994. *Monthly Weather Review*, v. 125, 2759-2786. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1997\)125<2759:CSITAE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1997)125<2759:CSITAE>2.0.CO;2)
- Marengo, J. A., & Nobre, C.A. (1997a). Climatic impacts of “friagens” in forested and deforested areas of the Amazon Basin. *Theoretical and Applied Climatology*, n. 73, 223-242. DOI: <https://doi.org/10.1590/0102-7786331014>
- Modernel, L. G. (2024). *Desastres climatológicos e meteorológicos: análise dos casos do Rio Grande do Sul ente 2020 e 2022*.
- Ninomiya, B. K. (1984). Characteristics of Baiu Front as a Predominant Subtropical Front in the Summer Northern Hemisphere. *Journal of Meteorological Society of Japan*, v. 62, 880-893. DOI: https://doi.org/10.2151/jmsj1965.62.6_880
- Nogueira, N. C. O., Machado, P. H. G., & Reboita, M. S. (2024). Estudo Climatológico das Frentes Frias atuantes no Sul do Rio Grande do Sul e no Sul de Minas Gerais entre 2009 e 2021. *Revista Brasileira de Climatologia*, 34, 306-334. DOI: [10.55761/abclima.v34i20.16664](https://doi.org/10.55761/abclima.v34i20.16664)
- Oliveira, R. D. (2023). *Sistema de detecção de frentes frias associadas a eventos meteorológicos de médio e alto impacto no centro sul da América do Sul (Doctoral dissertation)*.
- Parmenter, F. C. (1976). A southern hemisphere cold front passage at the equator. *Bulletin of the American Met. Soc.*, v. 57, n. 12, p. 1435–1440. DOI: [10.1175/1520-0477\(1976\)057<1435:ASHCFP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1976)057<1435:ASHCFP>2.0.CO;2)
- Reis, J. S. D., Gonçalves, W. A., Souza, D. O. D., & Mendes, D. (2022). Evaluation of Atmospheric Features in Natural Disasters due Frontal Systems over Southern Brazil. *Atmosphere*, 13(11), 1886. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos13111886>
- Riemann-campe, K. (2011). *Can convective precipitation variability be deduced from the variability in CAPE and CIN? An analysis of global CAPE and CIN variability in present and future climates*. Tese de Doutorado. University of Hamburg Hamburg. DOI: [doi: 10.17617/2.1412642](https://doi.org/10.17617/2.1412642)
- da Rocha, R. P., Reboita, M. S., & Crespo, N. M. (2024). Análise do evento extremo de precipitação ocorrido no Rio Grande do Sul entre abril e maio de 2024. *Journal Health NPEPS*, 9(1). DOI: [Journal Health NPEPS. 2024 jan-jun; 9\(1\):e12603. ISSN 2526-1010 http://dx.doi.org/10.30681/2526101012603](https://doi.org/10.30681/2526101012603)
- da Rocha Bartolomei, F., Ribeiro, J. G. M., & Reboita, M. S. (2023). Eventos Extremos de Precipitação no Sudeste do Brasil: Verão 2021/2022. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 16(05), 2658-2676. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.5.p2658-2676>
- Salio, P., Nicolini, M., & Saulo, A. C. (2002). Chaco low-level jet events characterization during the austral summer season. *Journal of Geophysical Research*, v. 107, 1-17. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2001JD001315>.
- Sanders, F. (2005). Real Front or Baroclinic Trough?. *Weather and Forecasting, FORECASTERS’ FORUM*. American Meteorological Society, v. 20, 647-651.
- Sanders, F., & Hoffman, E. G. (2002). A Climatology of Surface Baroclinic Zones. *Weather and Forecasting*, 17(4), 774-782. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(2002\)017<0774:ACOSBZ>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(2002)017<0774:ACOSBZ>2.0.CO;2)
- Sanders, F., & Doswell, C. A. III. (1995). A case . for detailed surface analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 76, No. 4. 505-522. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1995\)076<0505:ACFDSA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1995)076<0505:ACFDSA>2.0.CO;2)
- Sanders, F. & Kessler, E. (1999). Frontal Analysis in the Light of Abrupt Temperature Changes in a Shallow Valley. *Monthly weather review*, Vol. 127. 1125-1133. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1999\)127<1125:FAITLO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1999)127<1125:FAITLO>2.0.CO;2)
- Satyamurty, P., & Mattos, L. F. (1989). Climatological lower tropospheric frontogenesis in the midlatitudes due to horizontal deformation and divergence. *Monthly Weather Review*, v. 117, p. 1355-1989. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1989\)117<1355:CLTFIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1989)117<1355:CLTFIT>2.0.CO;2)
- Segura, C. S., & da Rocha, R. P. (2024). *Tendências*

- e variabilidade climática de frentes frias e precipitação na região metropolitana de São Paulo. *Revista Brasileira de Climatologia*, 34, 159-179. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1989\)117<1355:CLTFIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1989)117<1355:CLTFIT>2.0.CO;2)
- Seluchi, M. E., & Garreaud, R. D. (2012). Campos médios e processos físicos associados ao ciclo de vida da Baixa do Chaco. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.27, n.4, 447 – 462.
- Seluchi, M. E., Beu, C; & Andrade, K. E. (2017). Características das Frentes Frias Causadoras de Chuvas Intensas no Leste de Santa Catarina. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 32, n. 1, 25-37. DOI: <https://doi.org/10.1590/0102-778632120150095>
- Siqueira, J. R., & Toledo Machado, L. A. (2004). Influence of the Frontal Systems on the Day-to-Day Convection Variability over South America. *Journal of Climate*, 17(9), 1754-1766. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<1754:IOTFSO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<1754:IOTFSO>2.0.CO;2).
- Silva Dias, M. A. F. (2000). Índices de instabilidade para previsão de chuva e tempestades severas. Departamento de Ciências Atmosféricas. IAG. USP.
- Simões Reboita, Michelle; Machado CRESPO, Natália; Gozzo, Luiz Felipe. (2023). Uma introdução à análise de massas de ar, frentes e ciclones extratropicais na América do Sul. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 16, n. 6. DOI: 10.26848/rbgf.v16.6.p3263-3282
- Taljaard, J. J. (1972). Topics: synoptic meteorology of the Southern Hemisphere. *Meteor. Monographs*, v. 13, n. 35, 129-213 DOI: 10.1016/S0168-1923(02)00250