

## **Análise da Convergência do Fluxo de Umidade Verticalmente Integrada sobre o Brasil previsto pelo modelo WRF**

*Analysis of the Vertically Integrated Moisture Flux Convergence over Brazil predicted by WRF model*

Wiliam Morales, Yoshihiro Yamasaki

Departamento da Faculdade de Meteorologia, Universidade Federal de Pelotas , Brasil  
*wiliammorales@gmail.com; yamasaki@fis.ua.pt*

### **Resumo**

*Na América do Sul, as regiões de ocorrência do Jato de Baixos Níveis ao Leste dos Andes (JBNLA) e da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), são onde há a maior importação de umidade continental. Estes dois sistemas atuam sobre o Sul e Sudeste do Brasil, principalmente nas estações quentes do ano. Ao longo de 2011, as previsões feitas pelo modelo não-hidrostático de mesoescala Weather Research and Forecasting (WRF) (SKAMAROCK et al., 2008) com resolução espacial de grade de 18 km e 35 níveis verticais; foram utilizadas para analisar os campos de Convergência do Fluxo de Umidade Verticalmente Integrada (CFUVI) e explorar sua relevância na previsão de curto prazo. Muitos eventos de precipitação intensa, ocorridos durante o ano de 2011 sobre o Brasil, estiveram associados com JBNLA e ZCAS, e dois casos são apresentados. Os resultados mostram-se significativos, especialmente em seus prognósticos, com horizonte de previsão com 3 horas antes da ocorrência das tempestades. O estudo mostrou que os prognósticos da CFUVI indicaram que há uma boa concordância em termos da localização de aglomerados de nuvens que foram desenvolvidos, comparadas com as correspondentes representações nas sequências das imagens de satélite, nos três horários posteriores.*

**Palavras-chave:** WRF. CFUVI. Mesoescala. Fluxo de umidade.

### **Abstract**

*In the South America the regions of occurrence of the Low-Level-Jet at East Andes (LLJEA) and South Atlantic Convergence Zone (SACZ) where there are the largest import continental moisture. These two systems act over southern and southeast especially in the warm seasons of the year. Throughout 2011, the forecasts made by non-hydrostatic mesoscale Weather Research and Forecasting (WRF) model (SKAMAROCK et al., 2008) with 18 km grid spatial resolution and 35 vertical levels were used to analyze the Vertically Integrated Moisture Flux Convergence (VIMFC) fields and explore its relevance in the short-term forecasting activities. Several events of intense precipitation occurred during the 2011 year over Brazil were associated with LLJEA and SACZ, and two of them are presented. The results show meaning especially in their prediction with forecast horizon of 3 hours before the occurrence of storms. The study showed that the VIMFC prognosis indicated that there is a good agreement in terms of the location of cloudclusters that have been developed, compared with the corresponding representations in sequences compared with the of satellite images in the three hours after.*

**Keywords:** WRF. VIMFC. Mesoscale. Moisture flux.

## 1 Introdução

Estudos prévios de Kuo (1965; 1974) e também de Hudson (1971) mostraram que a Convergência do Fluxo de Umidade (CFU) deve incorporar a abordagem da integração vertical, para fins de previsão, em sistemas de escala sinótica, da precipitação associada a tempestades severas. Waldstreicher (1989) utilizou a CFU para localizar tempestades, enquanto Banacos e Schultz (2004) empregaram a Convergência do Fluxo de Umidade Verticalmente Integrada (CFUVI), nos estágios incipientes dos processos convectivos. A avaliação dos campos de CFU e CFUVI, para fins de previsão do tempo, vem sendo facilitada pelo suporte dos modelos numéricos. Esses modelos vêm sendo desenvolvidos, ao longo dos anos, para representar da melhor forma possível o comportamento termo-hidrodinâmico da atmosfera. Atualmente, dentre os modelos de mesoescala que vem sendo amplamente difundidos e utilizados pela comunidade científica como ferramenta de previsão de tempo, está o modelo WRF (Weather Research and Forecasting). No Brasil, o intenso fluxo de vapor que converge na baixa troposfera é ocasionado, comumente, pela Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e pelo Jato de Baixos Níveis do Leste dos Andes (JBNLA). Estudos de Kodama (1992) e de Quadro (1994; 2012) revelam que a convergência de umidade, na baixa troposfera, é caracterizada por uma banda de nebulosidade que apresenta orientação no sentido Noroeste (NO) - Sudeste (SE), estendendo-se da Amazônia até o oceano Atlântico Subtropical. Por outro lado, no interior do continente, o JBNLA serve como um corredor de umidade entre a América do Sul tropical e as férteis terras da Bacia do Paraná e Prata (MARENGO, 2000). Nas regiões onde atuam a ZCAS e JBNLA são desenvolvidas importantes atividades econômicas como à agricultura, pecuária e hidrelétrica, porém muito suscetíveis às variações de tempo e do clima. A representatividade da CFUVI, na previsão de curto prazo, é de grande importância para explorar os fatores físicos que ocasionam intensas precipitações, sendo decorrentes dos aglomerados de nuvens que se desenvolvem a partir da ZCAS e do JBNLA. Assim, foi investigado o emprego da CFUVI nas análises

procedidas comparando esses campos, com sequencia de imagens de satélites. Desta forma, poderá se concluir que a abordagem da CFUVI, como métodos prognósticos para acompanhar a evolução e localização de aglomerados de nuvens, são fundamentais às atividades de previsão de tempo.

## 2 Metodologia

Analisaram-se oito casos de precipitação extrema, que ocorreram em 2011, relacionadas à ZCAS e o JBNLA. Dos casos avaliados, selecionou-se o caso mais significativo de cada tipo de sistema meteorológico para descrever os resultados: o primeiro está relacionado à atuação da ZCAS, enquanto o segundo com um episódio de JBNLA. O processamento do modelo WRF foi realizado durante todo o ano de 2011, utilizando como condições iniciais e de contorno, os prognósticos do modelo global GFS (Global Forecast System), disponíveis no formato GRIB2. Estes prognósticos foram obtidos pelo sistema Internet de Distribuição de Dados Locais (Internet Data Distribution/ Local Data Manager-IDD/LDM) da Unidata/ EUA e implantado na Universidade Federal de Pelotas (UFPel), Amaral et al. (2011). O modelo WRF foi configurado com resolução horizontal de 18 km e 35 níveis eta na vertical, realizando simulação sobre um domínio de integração que abrange todo o território do Brasil, como ilustra a Figura 1. A partir do pós-processamento do WRF foi gerado um arquivo de dados para calcular, em cada ponto de grade, a Convergência do Fluxo de Umidade Verticalmente Integrada (CFUVI) entre os níveis de 1000 e 450 hPa pela equação:

$$CFUVI = -\frac{1}{g} \int_{p_2}^{p_1} \left( \frac{\partial uq}{\partial x} + \frac{\partial vq}{\partial y} \right) \Delta p \quad (1)$$

Onde  $u$  é a componente zonal do vento,  $v$  a meridional,  $q$  a umidade específica,  $\Delta p$  representa a camada da atmosfera,  $g$  é a aceleração devido à gravidade e,  $p_1$  e  $p_2$  correspondem a primeira e a segunda camada da atmosfera, respectivamente.

Em adição, foram utilizadas imagens realçadas do satélite geostacionário GOES-12 em conjunto dos boletins de registro de casos significativos do mês. Estas informações se encontram no site do Centro de Previsão de

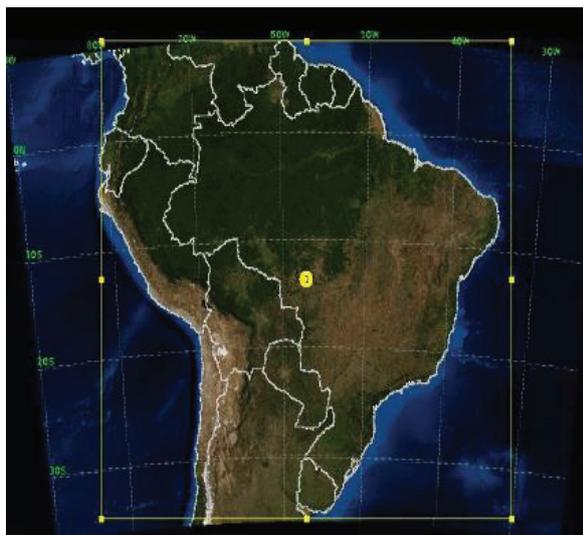


Figura 1 - Domínio de integração do modelo WRF

Tempo e Estudos Climáticos/ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE). Além disso, para detalhar o estudo dos casos selecionados, também foram examinadas sondagens atmosféricas plotadas em diagramas termodinâmicos Skew-T Log-p que são encontradas no site da University of Wyoming (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.htm>). Desta maneira, a análise dos prognósticos da CFUVI foi comparada com a sequência das imagens de satélites, nas três horas posteriores, com o objetivo de viabilizar esse campo na previsão de curto prazo.

### 3 Resultados e discussões

#### 3.1 Aglomerados de precipitação relacionados à ZCAS

No realce da imagem de satélite das 13 UTC de 15/01/2011, Figura 2(a), observa-se uma ampla faixa de umidade continental oceânica, no sentido NO-SE, indicando a atuação da ZCAS. A convecção ao longo da Zona de Convergência Inter Tropical (ZCIT) e sobre o altiplano boliviano, Amazônia e Sudoeste (SO) do oceano Atlântico, ocorre devido instabilidade na atmosfera. Este fato é reforçado pela temperatura de brilho alcançada no topo das nuvens convectivas, em torno de  $-60^{\circ}\text{C}$ , por exemplo. As configurações em superfície são ilustradas na Figura 2(b), nos campos de pressão ao nível médio do mar, barbelas e CFU em superfície, no

dia 15/01/2011 às 13 UTC. Nota-se, sobre a parte oceânica da ZCAS, um centro de baixa pressão pontual de 1008 hPa que, por sua vez, está localizado entre o ramo de atuação mais ocidental da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) - costa do nordeste (NE) brasileiro - e um anticiclone transiente que se desloca sobre sul do Brasil. Neste cenário, as barbelas de vento induzem à convergência de umidade oceânica principalmente em torno do centro de baixa pressão, como é indicado pela CFU.

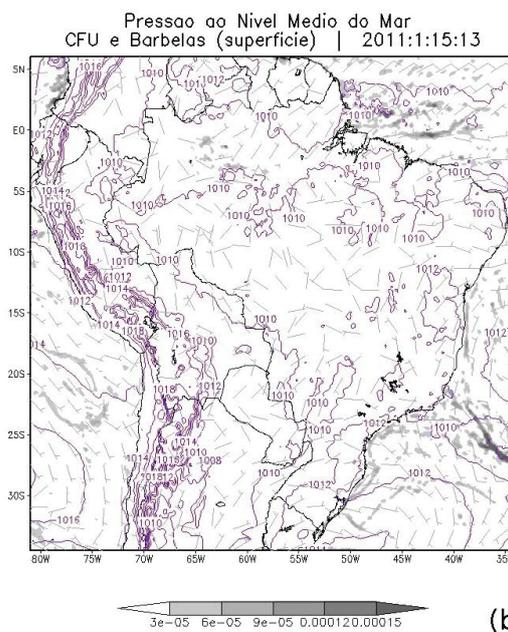
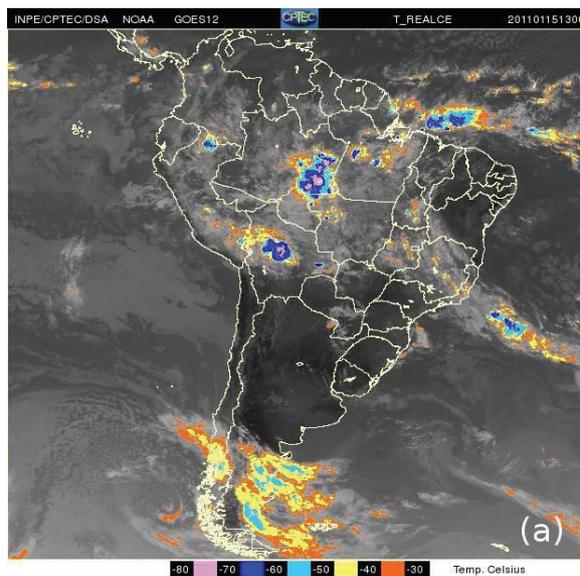


Figura 2 – Imagem do satélite GOES-12 (a); pressão ao nível médio do mar, barbelas dos ventos e CFU em superfície (b); no dia 15/01/2011 às 13 UTC.

Simultaneamente, sobre a faixa de atuação da ZCIT, a CFU é mais intensa no oceano Atlântico, mas não deixa de ser significativa sobre alguns pontos na bacia Amazônica. Neste caso, os ventos Alísios que transportam umidade para o interior do continente forçam a interação do vapor marinho com a evapotranspiração das florestas, fornecendo condições ideais à ocorrência de chuvas.

Abordando apenas a camada de interesse, a Figura 3 (a) ilustra o campo de CFUVI entre os níveis de 1000 e 450 hPa às 13 UTC de 15/01/2011. Observa-se que a CFUVI é expressiva ao longo da faixa NO-SE do continente devido à convergência de umidade nas camadas inferiores da troposfera, aquecimento junto à superfície e liberação de calor latente. A CFUVI também aparece significativa próximo dos 30°S de latitude, no sopé da Cordilheira dos Andes, na região da depressão termo-orográfica conhecida como Baixa do Noroeste da Argentina (BNA). A BNA está relacionada com a dinâmica dos sistemas transientes e com inversões térmicas devido à compressão adiabática e aquecimento que o ar frio e seco é submetido em ocasiões de subsidência. A umidade é o combustível para que as chuvas ocorram, mas antes de haver precipitação o vapor d'água deve condensar. Considerando o interesse no produto da condensação do vapor na atmosfera, a Figura 3(b) exibe o campo de água precipitável entre 1000 e 450hPa e barbelas do vento em 850hPa às 13 UTC de 15/01/2011. Como esperado, a água precipitável é mais intensa na faixa de atuação da ZCIT, ZCAS e, sobretudo, na região da Amazônia. Além disso, observa-se que o vapor na atmosfera é mais presente sobre a costa do oceano Atlântico do que sobre a costa do oceano Pacífico, em função das correntes marítimas de Humboldt (fria) e do Brasil (quente), respectivamente. Também é notável, nas camadas inferiores da troposfera, o comportamento dos ventos no transporte meridional de umidade e calor entre os trópicos e os subtropicais, indicado pelas barbelas.

As radiossondagens permitem uma holística termodinâmica da atmosfera. Na Figura 4 são exibidos diagramas Skew-T Log-P das 12 UTC, em 15/01/2011, nas estações de Belo Horizonte/MG (Confis) e Rio de Janeiro/RJ (SBGL). A semelhança entre Confis e SBGL se dá

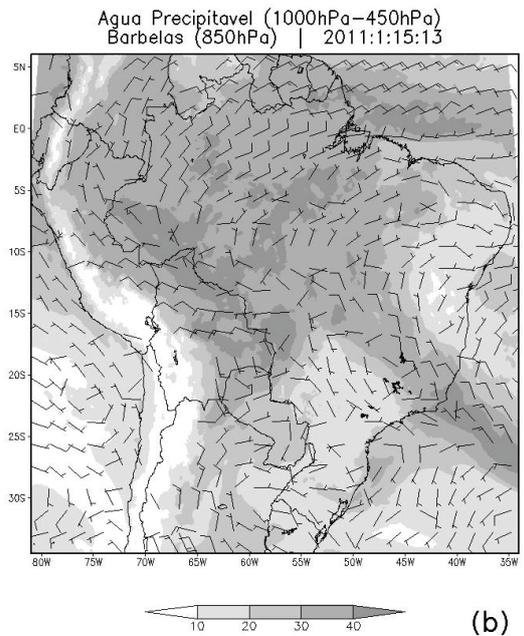
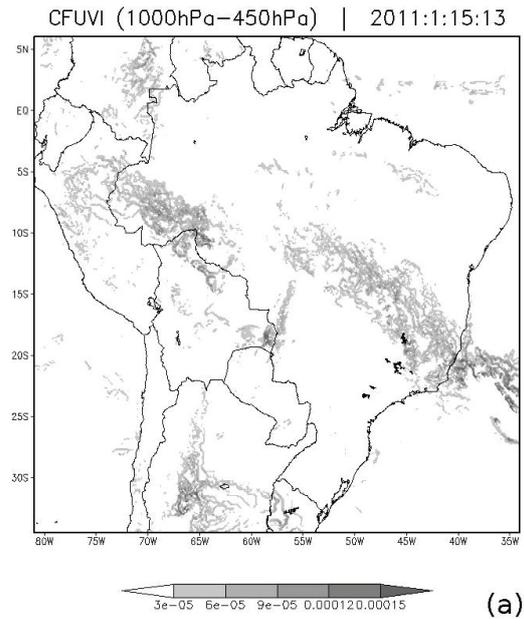


Figura 3 – CFUVI entre 1000 e 450 hPa (a); água precipitável entre 1000 e 450hPa com barbelas dos ventos em 850hPa (b); no dia 15/01/2011 às 13 UTC.

pelo fato de que, em ambos os casos, a atmosfera apresenta instabilidade condicional do tipo latente real e os valores dos índices de instabilidade ser parecidos. Por exemplo, a combinação de alguns índices favorece o desenvolvimento de, pelo menos, convecções isoladas de nuvens do tipo cumuliformes. O índice K indica tormentas dispersas numa atmosfera sem inibição convectiva (CIN), a qual, a energia potencial convectiva disponível

(CAPE), mesmo sendo pouco acentuada, apresenta valores marginalmente instáveis. Outros índices de igual importância como o LIFT e SHOW, mostram-se relacionados com instabilidade, enquanto que o TT e SWEAT não são relevantes. No entanto, há diferenças nos perfis verticais de T e Td, nas duas estações. Em Confis, Figura 4(a), a saturação ocorre nas primeiras camadas e a advecção quente e úmida promovida pela ZCAS é observada até a troposfera média, mas T e Td seguem próximos mesmo em altos níveis. Em SBGL, na Figura 4(b), o aporte de vapor na baixa troposfera está relacionado com a atuação da ASAS, sendo indicado pelas barbelas de vento. Vale ressaltar que T e Td têm comportamentos constantes e próximos, ao longo da baixa e média troposfera, sugerindo uma atmosfera propícia aos movimentos convectivos, mas se afastam na alta troposfera.

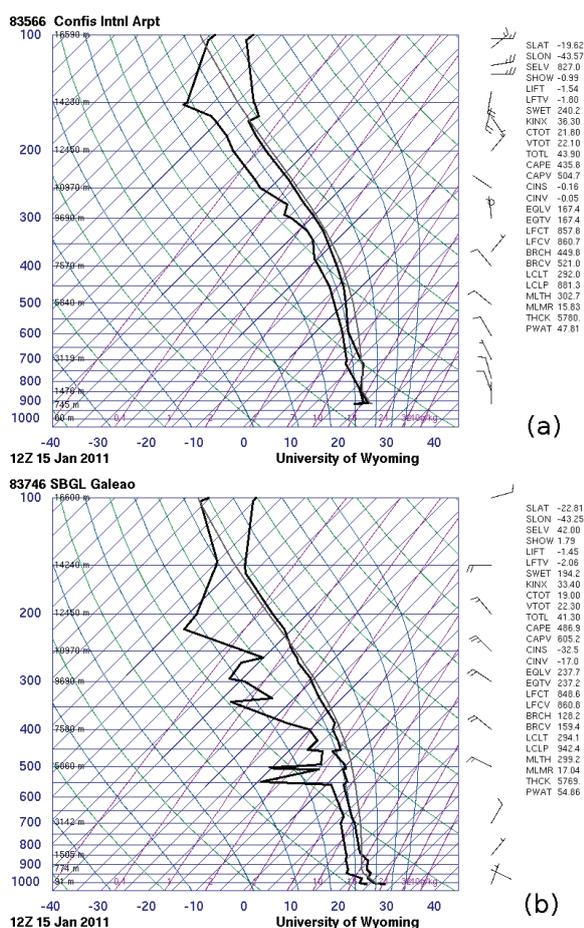


Figura 4 – Diagrama Skew-t Log-P de radiossondagens nas 12 UTC de 15/01/2011 para: (a) Belo Horizonte/MG (Confis) e (b) Rio de

Janeiro/RJ (SBGL).

Como foi mostrado, os campos de CFUVI e água precipitável, além do auxílio do diagrama termodinâmico, indicam umidade considerável, desde as camadas inferiores da troposfera até o nível de 450 hPa, particularmente, na região da ZCAS. A partir desta premissa, a CFUVI foi comparada com as imagens de satélite que cobrem a região SE do Brasil, nos três horários posteriores, com objetivo de utilizá-la como método prognóstico à previsão de aglomerados de precipitação em curto prazo. A Figura 5 ilustra as imagens realçadas do satélite GOES-12 sobre a região SE no dia 15/01/2011 às 14:00 UTC (a), 15:00 UTC (b) e 16:00 UTC (c), respectivamente. Na parte continental da ZCAS predominam nuvens baixas por toda região com exceção de alguns pontos isolados, no interior de GO e MG, onde ocorrem aglomerados de nuvens com temperatura de brilho em torno de  $-50^{\circ}\text{C}$ . No entanto, na Figura 5(b) e Figura 5(c), a atividade convectiva se espalha e os aglomerados evoluem sobre os estados de MT, GO, MG, RJ e ES, em questão de algumas horas. Nos dias seguintes a 15 de janeiro de 2011, a ZCAS manteve o regime de chuvas constantes, intercaladas por chuvas torrenciais. Em toda região SE a precipitação acumulada superou a média mensal para o referente mês; com a ocorrência de alagamentos em função do volume de chuva. Enquanto na região serrana do RJ houve deslizamentos de terra com registro de mortes. Em MG, os transtornos causados pelas chuvas torrenciais foram por conta de transbordamento de rios.

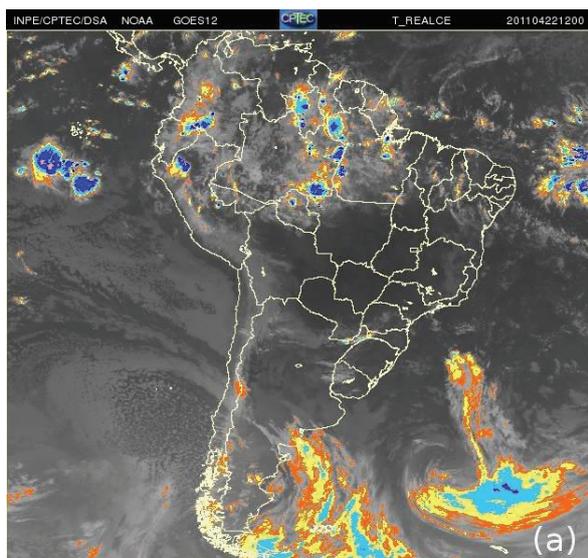


Figura 5 – Imagem do satélite GOES-12 cobrindo a região SE do Brasil às 14 UTC (a), 15 UTC (b) e 16 UTC (c) no dia 15/01/2011.

### 3.2 Aglomerados de precipitação relacionados ao JBNLA

A Figura 6(a) exibe o realce da imagem de satélite das 12 UTC de 22/04/2011, onde a temperatura de brilho em algumas nuvens alcança  $-60^{\circ}\text{C}$ , indicando a convecção na parte oceânica da ZCIT, visto sobre o Atlântico e Pacífico, e em algumas regiões da Amazônia. Sobre o continente, este processo convectivo está associado com a liberação de calor latente, aquecimento junto à superfície e a interação do vapor oceânico com a evapotranspiração da floresta. Em maiores latitudes, entre o Sul e SO do oceano Atlântico, observam-se dois sistemas transientes com deslocamento aproximadamente zonal. Neste último, parte do setor da frente quente atua sobre a região de interesse, onde nuvens cumuliformes alcançam temperatura de brilho em torno de  $-30^{\circ}\text{C}$  a  $-40^{\circ}\text{C}$ . As configurações em superfície são exibidas na Figura 6(b) pelos campos de pressão ao nível médio do mar, barbelas e CFU em superfície, do dia 22/04/2011 às 12 UTC. Análogo ao caso anteriormente estudado, a CFU é mais intensa sobre os oceanos do que sobre o continente. No SO do oceano Atlântico, com o auxílio do campo isobárico em questão e barbelas, nota-se que a CFU é mais concentrada sobre a região de interação entre o ramo ocidental da ASAS com o ramo quente do sistema transiente. Além disso, a CFU também é significativa sobre alguns pontos na bacia Amazônica, bem como ao longo da ZCIT e, no oceano Pacífico, está relacionada com nuvens baixas, segundo os tons de cinza escuro mostrados no realce da imagem de satélite. Em adição, sobre a América do Sul, a pressão ao nível médio do mar revela uma ampla área com baixa pressão, ao sopé da Cordilheira dos Andes, com núcleo de  $1004\text{ hPa}$  representada pela BNA. Por isso, no interior do continente, as barbelas exibem o comportamento meridional dos ventos, sugerindo o transporte de vapor entre a Bacia Amazônica e a Bacia do Prata.

A Figura 7(a) ilustra o campo de CFUVI entre os níveis de  $1000$  e  $450\text{ hPa}$  às 12 UTC de 22/04/2011. Nota-se que a CFUVI é expressiva sobre o SO do oceano Atlântico e está vinculada ao deslocamento do sistema transiente que já foi mencionado. Esta configuração é similar aos resultados que Peixoto e Oort (1992)



Pressão ao Nível Médio do Mar  
CFU e Barbelas (superfície) | 2011:4:22:12

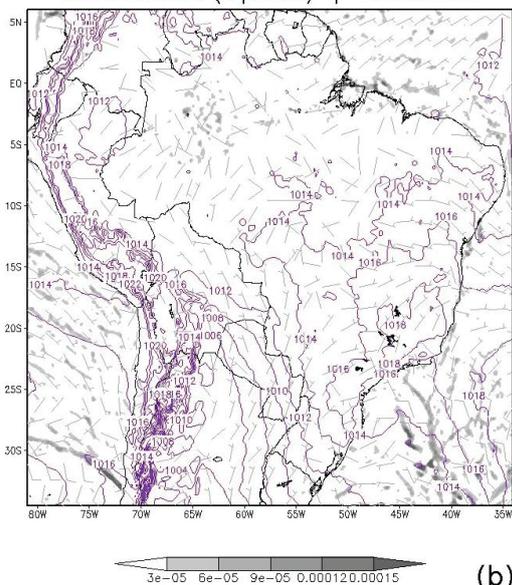
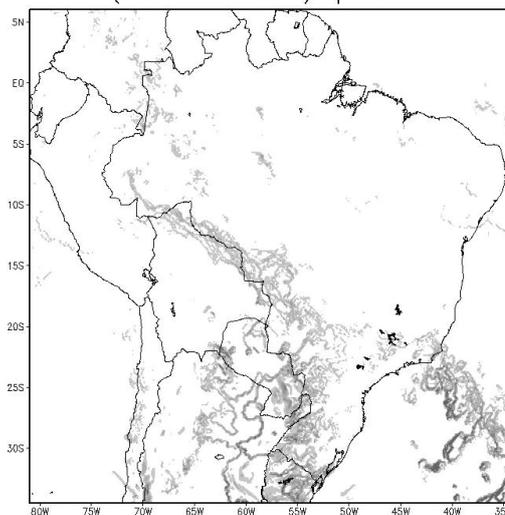


Figura 6 – Realce da imagem do satélite GOES-12 (a); pressão ao nível médio do mar, barbelas dos ventos e CFU em superfície (b); no dia 22/04/2011 às 12 UTC.

encontraram ao analisar o transporte meridional de vapor causado por turbilhões transientes. Segundo os autores, o fluxo é direcionado aos polos em todas as latitudes e em todos os níveis, alcançando máxima intensidade nas latitudes médias e abaixo de 850 hPa. Além disso, sobre o continente, a CFUVI intensifica-se do SE da Amazônia até a Bacia do Prata, indicando o transporte meridional de vapor que é feito pelo JBNLA. Em outras palavras, da região de entrada do JBNLA em direção a sua região de saída. A Figura 7(b) exhibe o campo de água precipitável entre 1000 e 450 hPa e barbelas do vento em 850hPa às 12 UTC de 22/04/2011.

CFUVI (1000hPa–450hPa) | 2011:4:22:12



Água Precipitável (1000hPa–450hPa)  
Barbelas (850hPa) | 2011:4:22:12

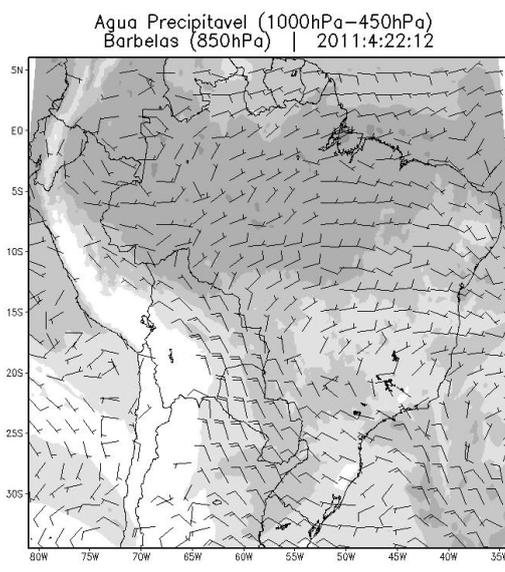


Figura 7 – CFUVI entre 1000 e 450 hPa (a); água precipitável entre 1000 e 450hPa com barbelas dos ventos em 850hPa (b); no dia 22/04/2011 às 12 UTC.

Semelhante ao caso anterior, o campo de água precipitável também apresenta mais concentração nas regiões da ZCIT e amazônica, bem como em maior quantidade sobre o oceano Atlântico em relação ao oceano Pacífico. No entanto, a diferença fica por conta da maior concentração no SO do oceano Atlântico, em função do sistema transiente - já citado algumas vezes - e sobre a bacia do Prata. Outra diferença é notada pela direção das barbelas em 850hPa, indicando o fluxo meridional de umidade, no interior do continente.

A Figura 8 exibe o diagrama Skew-T Log-P das radiossondagens às 12 UTC de 22/04/2011 para Resistência/Cha-ARG (SARE), Figura 8(a), e para Uruguaiana/RS (SBUG), Figura 8(b). Em ambos as estações, houve semelhanças importantes, tanto nos valores dos índices de instabilidade quanto no perfil vertical termodinâmico. Entre SARE e SBUG notam-se, respectivamente, variações nos índices SHOW (de muito instável a instável), TT (de fraca a tormentas moderadas) e CAPE (de moderadamente instável a pouco instável). Por outro lado, a equivalência nos índices indica uma atmosfera instável (LIFT) e com tormentas (SWET e K), mas com elevada inibição convectiva (CIN). Em adição, na baixa troposfera, observa-se que a ocorrência da inversão de radiação junto à superfície é mais acentuada em SARE do que em SBUG. O perfil vertical de T e Td são próximos, sugerindo a saturação por causa do transporte meridional de umidade e advecção quente feito pelo JBNLA. Este fenômeno é notável sobre SARE e SBUG, entre os níveis de 950-700hPa e 850-700hPa, respectivamente. No entanto, T e Td se afastam devido a inversão de subsidência orográfica em decorrência ao escoamento do ar à sotavento da Cordilheira dos Andes. Esta mudança no conteúdo de vapor e na temperatura acontece entre 660-590hPa, na plotagem de SARE, e entre 670-610hPa, na plotagem de SBUG, aproximadamente. Além disso, na troposfera superior, ressalta-se a atuação das correntes de jato que são indicadas pela componente zonal dos ventos, bem como a intensidade denotada pelas barbelas. Em geral, sobre a região em questão, a atmosfera revela condições favoráveis ao desenvolvimento de tempestades, onde a instabilidade condicional, em ambos os casos, é do tipo latente real e devido, principalmente, ao índice CAPE ser mais acentuado quando comparado aos casos anteriores.

Do mesmo modo investigado para o caso de ZCAS e com o mesmo objetivo, comparou-se a CFUVI com as imagens de satélite das 13, 14 e 15:00 UTC. A Figura 9 ilustra a sequência de

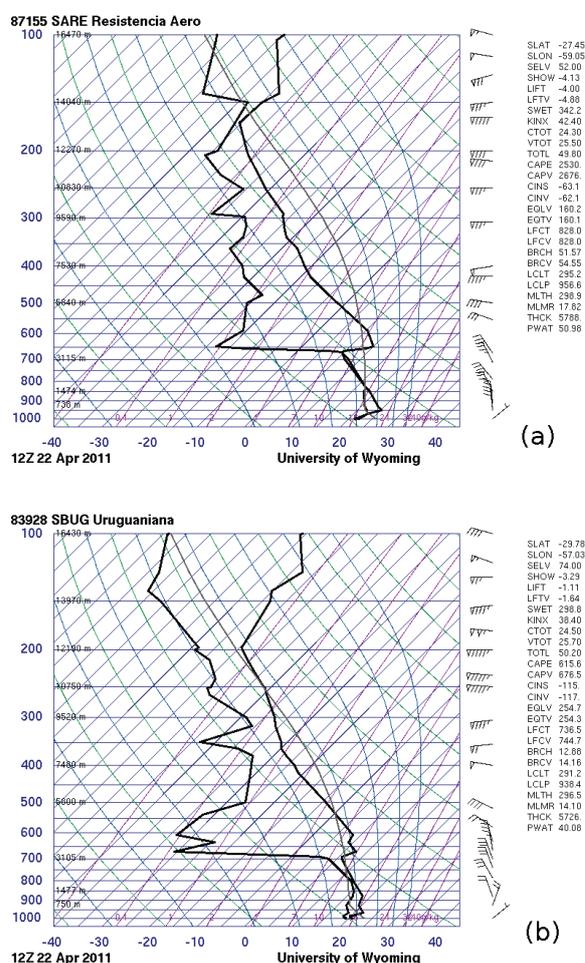


Figura 8 – Diagrama Skew-t Log-P de radiossondagens nas 12 UTC de 22/04/2011 para: (a) Resistência/Cha-ARG (SARE) e (b) Uruguaiana/RS (SBUG).

imagens realçadas do satélite GOES-12 do dia 22/04/2011 sobre a região Sul às 13:00 UTC (a), 14:00 UTC (b) e 15:00 UTC (c), respectivamente. Observa-se que em menos de 1 hora, eclodem subitamente nuvens convectivas no NE da Argentina, Oeste de SC e NO do RS. Quando a CFUVI foi comparada com a sequência das imagens de satélite, houve uma representatividade fidedigna da evolução de aglomerados de nuvens que surgiram na região, provocando chuvas. Ao longo das 3 horas posteriores a convecção prosseguiu sobre o NO do RS e esteve fortalecida pelo JBNLA, desenvolvendo nuvens que mantiveram temperaturas de brilho em torno de -50 e -60°C.

É possível que o campo de CFUVI tenha atuado como uma forçante para desencadear a convecção profunda depois de romper uma camada de inversão mais enfraquecida. Este comportamento foi encontrado nos resultados de Waldstreicher (1989) e de Banacos e Schultz (2004). Os aglomerados de nuvens que ocasionaram tempestades, nos dias 22 e 23 de abril sobre o RS, causaram transtornos como destelhamentos de residências, danos em aviários e plantações de milho; bem como interrupção do fornecimento de energia elétrica e queda de granizo em alguns pontos isolados.

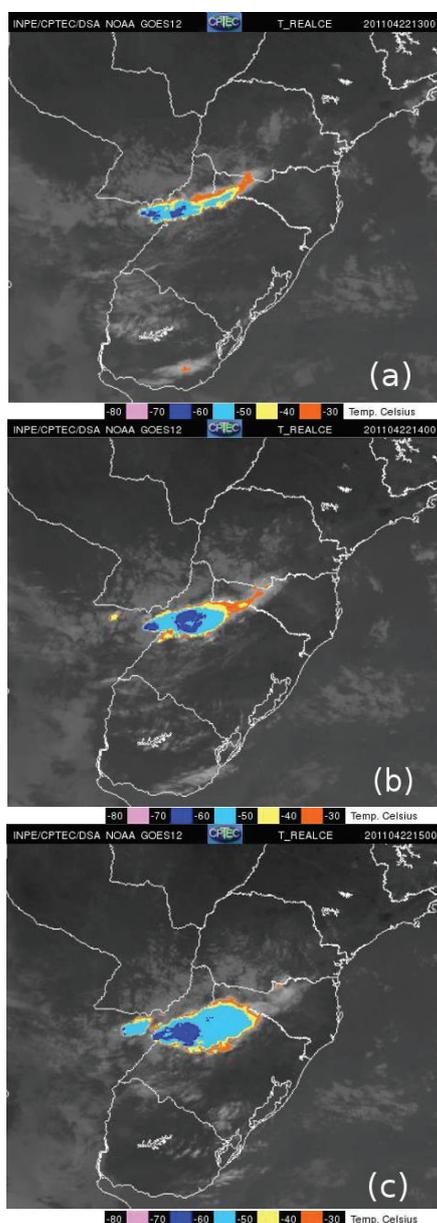


Figura 9 - Imagem do satélite GOES-12 cobrindo a região Sul do Brasil às 13 UTC (a), 14 UTC (b) e 15 UTC (c) no dia 22/04/2011.

## 4 Conclusões

Foram analisados oito casos de aglomerados de nuvens que causaram precipitação intensa sobre o Brasil em 2011, devido à atuação da ZCAS e do JBNLA. Os prognósticos do modelo de mesoescala WRF, referentes à CFUVI, foram comparados com a sequência das imagens de satélite, nas três horas posteriores, visando utilizá-los à previsão de curto prazo. Ressalta-se que, todas as análises apresentaram resultados semelhantes, por isso, as conclusões são baseadas nos casos mais extremos que foram selecionados: o primeiro está associado à ZCAS e segundo com o JBNLA. O estudo mostrou que: i) os prognósticos da CFUVI indicaram boa concordância com a localização de aglomerados de nuvens quando foram comparados com as imagens de satélite, nos três horários posteriores; ii) os prognósticos da CFUVI, principalmente nas latitudes médias, mostraram-se viáveis no auxílio da previsão de tempestades, a qual foram ocasionadas pelos aglomerados de nuvens que causaram precipitações; iii) a CFU em superfície foi mais significativa sobre os oceanos e quase desaparece dentro do continente, exceto na bacia Amazônica e ao longo da faixa litorânea do Brasil. Por outro lado, a CFUVI é mais representativa sobre o continente, proporcionando maiores detalhes do comportamento do vapor envolvido com fenômenos meteorológicos responsáveis pela mudança do tempo; iv) apesar da convergência de umidade, climatologicamente, ser muito acentuada na região da ZCIT devido ao transporte de vapor de ambos hemisférios; o comportamento da CFUVI revelou ser mais meridional em todos os casos, tendo sua componente zonal pouco representativa, particularmente na zona equatorial.

## Agradecimentos

O primeiro autor agradece a todas as instituições que proporcionaram o acesso aos dados, bem como ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia (PPGMet) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de nível Superior (CAPES) pelo financiamento da pesquisa.

## Referências

AMARAL, L. M. C.; HOMANN, C. T.; YAMASAKI, Y. Sistema integrado IDD e modelo de mesoescala. In: VIII LATIN AMERICAN AND IBERIAN CONGRESS OF METEOROLOGY CLIMET XIII X CONGRESS OF METEOROLOGY CONGREGMET X. 10., 2009, Buenos Aires. **Anais...**Buenos Aires, 2009.

ARAKAWA, A.; LAMB, V. R. Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model. General circulation models of the atmosphere. (A78-10662 01 – 47) New York: Academic Press, p.173-265, 1977.

ARRAUT, J. M.; SATYAMURTY, P. Precipitation and water vapor transport in the southern hemisphere with emphasis on the South American region. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v.48, p.1902-1912, 2009.

BANACOS, P.; SCHULTZ, D. The use of moisture flux convergence in forecasting convective initiation: historical and operational perspectives. *Weather and Forecast*, v.20, n.3, p. 351-366, 2005.

BONNER, W. D. Climatology of the Low Level Jet. *Monthly Weather Review*, v.96, n.12, p.833-850, 1968.

CENTRO DE PREVISÃO DO TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS / INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Disponível em: <<http://tempo.cptec.inpe.br/>> Acesso em: 12 jul. 2012.

DOUGLAS, M. W.; NICOLINI, M.; SAULO, A. C. The Low-Level jet at Santa Cruz, Bolívia during January-March 1998, pilot balloon observations and model comparisons. In: SYMPOSIUM ON GLOBAL CHANGE STUDIES, 10., 1999, Dallas. **Anais ...** Dallas, 1999. p.223-226.

DUDHIA, J. Numerical Study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. *Journal of Atmospheric Sciences*, v.46, n.20, p.3077-3107, 1989.

HUDSON, H. On the relationship between horizontal moisture convergence and convective cloud formation. *Journal of Applied*

*Meteorology*, vol. 10, p.755-762, Aug.1971.

KODAMA, Y. Large-scale common features of subtropical precipitation zones (the Baiu frontal zone, the SPCZ and the SACZ) Part I: Characteristics of subtropical frontal zones. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, v.70, n.4, p.813-835, 1992.

KUO, H.L. On formation and intensification of tropical cyclones through latent heat release by cumulus convection. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v.22, p.40-63, 1965.

KUO, H. L. Further studies of the parameterization of the influence of cumulus convection on large-scale flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v.31, p.1232-1240, 1974.

LIEBMANN, B.; KILADIS, G. N.; VERA, C. S.; SAULO, A. C.; CARVALHO, L. M, V. Sub-seasonal variations of rainfall in south America in the vicinity of the Low-Level-Jet east of the Andes and comparison to those in the South Atlantic Convergence Zone. *Journal of climate*, v.17, n.19, p.3829-3842, 2004.

LIMA, K. C.; SATYAMURTY, P. Post-summer heavy rainfall events in Southeast Brazil associated with South Atlantic Convergence Zone. *Atmospheric Science Letters*, n.11, p.13-20, 2010.

MARENGO, J. A.; SOARES, W.R. Episódios de Jatos de Baixos Níveis ao Leste dos Andes durante 13-19 de abril de 1999. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.17, n.1, p.35-52, 2002.

MISRA, V.; DIRMEYER, P. A.; KIRTKMAN, B. P.; JUANG, H.; KANAMITSU, M. Regional simulation of Interannual Variability over South America. *Journal of Geophysical Research*, v.107, n.d20, p.8036-8051, 2002.

NOGUES-PAEGLE, J.; MO, K. C. Alternating wet and dry conditions over South America during summer. *Monthly Weather Review*, v.125, n.2, p.279-291, 1997.

PAEGLE, J. A comparative review of South American Low Level Jets. *Meteorologica*, v.3, n.1-2, p.73-81, 1998.

PEIXOTO, José Pinto; OORT, Abraham. *Physics of Climate*. 1.ed. New York: Springer, 1992. 520p.

PESQUEIRO, José Fernando. *Balço de umidade na região do sistema de monção da*

América do Sul em cenários climáticos futuros (2071-2100) utilizando o modelo Eta: um estudo de caso de modelagem. 2009. 242f. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos.

QUADRO, Mario Francisco Leal de. Estudo de episódios de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) sobre a América do sul. 1994. 99f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos.

REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; DA ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.24, n.2, p.185-204, 2010.

SATYAMURTY, P.; DA COSTA, C.; DOS SANTOS, A. C.; MANZI, A. O. Convergência do fluxo de umidade sobre a região Amazônia nos anos contrastantes 2005 e 2009. In: XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA. 6., 2010. Belém. **Anais ...** Belém, 2010.

SELUCHI, M. E.; MARENGO, J. A. Tropical-mid latitude exchange of air masses during Summer and Winter in South America: Climatic aspects and extreme events. *International Journal of Climatology*, v.20, n.10, p.1167-119, 2000.

SELUCHI, M. E.; SAULO, A. C. Baixa do Noroeste argentino e Baixa do Chaco: características, diferenças e semelhanças. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.27, n.1, p.49-60, 2012.

SKAMAROCK, W. C.; KLEMP, J. B.; DUDHIA, J. ; GILL, D. O.; BARKER, D. M.; WANG, W.; POWERS, J. G. A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR/Tech. Notes, 2008.

SKAMAROCK, W.C; WEISMAN, M. L. The impact of positive-definitive moisture transport on NWP precipitation forecasts. *Monthly weather review* :submitted. 2008.

THE WEATHER RESEARCH & FORECASTING MODEL. Disponível em: <<http://www.wrf-model.org/index.php>> Acesso em: 05 abr. 2012.

UNIVERSITY OF WYOMING. Department of Atmospheric Science. Weather. Disponível em:

<<http://weather.uwyo.edu/>> Acesso em: 13 ago. 2012.

VAN ZOMEREN, J; VAN DELDEN, A. Vertically integrated moisture flux convergence as a predictor of thunderstorms. *Atmospheric and Research*, v.83, n. 2-4, p. 435-445, 2007.

WALDSTREICHER, J. A guide to utilizing moisture flux convergence as a predictor of convection. *National Weather Dig.* Vol. 14, n. 4, p. 20-35, 1989.

WICKER, L. J; SKAMAROCK, W. C. Time splitting methods for elastic models using forward time schemes. *Monthly weather review*, n.130, p.2088-2097, 2002.

WRF (ARW) Version 3 Modeling System User's Guide. Mesoscale & Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, U.S.A., Jan. 2012. Disponível em: <<http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/>> Acesso em: 10 jun. 2012.