

Ligação da extremidade frontal com zona de convergência intertropical (zcit) e análise de fenômenos associados.

Connection of the frontal extremities with intertropical convergence zone and analysis of associated phenomena.

Gomes António Muanza¹; Natalia Fedorova²; Vladimir Levit³

¹ Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica de Angola (INAMET), Luanda/AO, Angola. Email: gomesmuanza@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2824-1722>

² Universidade Federal de Alagoas, (UFAL), Maceió/AL, Brasil. Email: nataliabras@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4154-6830>

³ Universidade Federal de Alagoas, (UFAL), Maceió/AL, Brasil. Email: vladimirle@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0707-467X>

Resumo: A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e as Extremidades Frontais (EF) são os principais sistemas produtores de chuvas intensas no Nordeste brasileiro (NEB). A influência simultânea de ambos os sistemas causa prejuízos à sociedade devido a enchentes e deslizamentos de terra. Os objetivos do estudo são os seguintes: identificação da estrutura EF ligada ao ZCIT; elaboração do padrão de circulação atmosférica e análise dos fenômenos associados. A identificação frontal foi elaborada usando advecção de temperatura potencial equivalente, vorticidade relativa e imagens de satélite infravermelho. Cinco eventos mostraram conexão dos sistemas frontais com ZCIT durante o período de estudo (2008-2017). A análise sinótica da estrutura troposférica apresentou diferenças entre os casos do sistema frontal conectado com ZCIT e os casos sem tal conexão. Ambos os padrões da troposfera para a zona frontal conectada com ZCIT e não conectada foram elaborados. Esta conexão ocorre quando: Corrente de Jato Subtropical (CJS) está no sudoeste do Brasil; circulação anticiclônica em altos níveis é apresentada no NEB [excluindo evento com Vortice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN)]. A ligação da ZCIT e EF não acontece quando: está presente CJS e circulação ciclônica em altos níveis no NEB. Em todos os casos que apresentaram ligação da ZCIT com EF foram registradas as ocorrências de Névoa úmida e chuva forte. Um dos casos (20-28/05/2017) com ligação dos dois sistemas causaram chuva forte, deslizamentos de terra e 4 mortes em Alagoas.

Palavras-chave: Zona frontal; Padrões de circulação; NEB.

Abstract: The Intertropical Convergence Zone (ITCZ) and Frontal Extremities (FE) are the main systems producing heavy rain in the Brazilian Northeast (BNE). The simultaneous influence of both systems causes damage to society due to floods and landslides. The study aims are as follows: identification of the FE structure connected with ITCZ; elaboration of the atmospheric circulation pattern and analysis of the associated phenomena. Frontal identification was elaborated using potential equivalent temperature advection, relative vorticity and infrared satellite images. Five events showed connection of the frontal systems with ITCZ during the study period (2008-2017). Synoptic analysis of the tropospheric structure presented differences between cases of the frontal system connected with ITCZ and cases without such connection. Both patterns of the troposphere for the frontal zone connected with ITCZ and not connected were elaborated. This connection occurs when: Subtropical Jet Stream (SJS) is in the southwest of Brazil; anticyclonic circulation at the high levels is presented in the BNE [excluding event with High Tropospheric Cyclonic Vortex- (HTCV)]. The connection of ITCZ and FE does not happen when SJS and cyclonic circulation at the high levels is in the BNE. Humid mist and heavy rain were recorded in all ITCZ and FE connection cases. One of the cases (20-28/05/2017) with connection of the two systems caused heavy rain, 4 deaths and landslides in Alagoas.

Keywords: Frontal zone; Circulation patterns; BNE.

1. Introdução

A agricultura e a pecuária são a base econômica do Estado de Alagoas (Nordeste brasileiro), e a produtividade depende da distribuição e frequência da precipitação (MARQUES, 2008, p.22).

Três regiões com diferentes tipos de regime de precipitação no Nordeste do Brasil (NEB) são descritas (STRANG, 1972; MOLION & BERNARDO 2002): 1) região norte com período úmido entre fevereiro e maio, 2) região sul com período úmido entre os meses de novembro-fevereiro e 3) região costeira com a temporada de chuvas de abril a julho.

Os principais sistemas que formam chuva na região norte são a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), brisas e Perturbação de Onda nos ventos Alísios (POA) (HASTENRATH & HELLER, 1977; CITEAU et al. 1988; UVO 1989; MOLION & BERNARDO, 2002). O sistema frontal estacionário é o principal sistema de formação de precipitação na região sul (ANDRADE, 2007). As precipitações na região costeira são devidas à circulação da brisa marítima (KOUSKY, 1979), Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN) (KOUSKY & GAN, 1981) e extremidade frontal (GEMIACKI, 2005, CRUZ, 2008).

O período principal de chuvas da costa leste do Nordeste concentra-se entre os meses de maio e agosto, sendo as extremidades de sistemas frontais um dos principais sistemas meteorológicos atuante durante nesta época do ano (PONTES DA SILVA et al., 2011).

A posição e a intensidade da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), no Oceano Atlântico Equatorial, é de extrema importância na determinação da qualidade do período chuvoso da região semiárida do Nordeste. Pesquisas realizadas mostram o efeito das condições oceânicas e atmosféricas que modulam a variabilidade sazonal da ZCIT e sua relação com a pluviometria sobre o norte do Nordeste do Brasil (HASTENRATH & HELLER, 1977; HASTENRATH, 1984; & XAVIER et al., 2000). A principal característica deste sistema é se posicionar sobre as áreas oceânicas com anomalias de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) positivas e anomalias de Pressão ao Nível do Mar (PNM) negativas (HASTENRATH, 1991).

Algumas vezes, a ZCIT tende a se deslocar um pouco mais ao sul ou mais ao norte de sua posição climatológica, como observado em anos de *El Niño* (*La Niña*), onde a banda convectiva, associada, tende a se deslocar um pouco mais para norte ou para sul (COELHO et al., 2004). Moura e Shukla (1981) sugeriram que a variação das Temperaturas da Superfície do Mar (TSM) é o principal fator da variação da ZCIT, quando as temperaturas no atlântico sul estão mais quentes (positiva) com relação ao Atlântico Norte (negativa), a ZCIT tende a se deslocar para o sul e o inverso a ZCIT tende a se deslocar para o norte, contribuindo para anos chuvosos ou secos no NEB, denominado dipolo do Atlântico.

A interação terra-mar é de grande importância para se entender o posicionamento da ZCIT ao norte e ao sul do equador. Diversas variáveis físicas são utilizadas para localizar as flutuações no posicionamento médio da ZCIT (MOURA & SHUKLA, 1981).

As frentes frias afetam a América do Sul durante o ano todo (KOUSKY, 1979). As frentes frias podem ser identificadas através de imagens de satélite junto com modelos atmosféricos operacionais, levando em conta o giro do vento para direção sul, persistência do vento de sul por pelo menos um dia, e uma queda de temperatura do ar simultânea ao giro do vento ou até dois dias depois (RODRIGUES et al., 2004). Durante a passagem de uma frente fria, há um aumento de pressão, uma brusca queda na temperatura, aumento na força do vento, variação na sua direção.

A necessidade da identificação de zona frontal está associada com a ocorrência de precipitação a esta zona frontal. Processos de formação de precipitação no NEB foram resumidos por MOLION e BERNARDO (2002), onde os autores apresentam evidência de ocorrência de precipitação intensa nas zonas frontais. Uma associação dos sistemas sinóticas e em mesoescala com precipitação intensiva foi estudada por PONTES DA SILVA et al. (2011) e durante o seu estudo detectaram que as Zonas frontais estão entre os sistemas mais importantes o que produzem precipitações no NEB. Diante disto, a identificação da zona frontal na região tropical é difícil na prática operacional. Uma estrutura frontal nesta região é diferente do que na região extratropical e, por conseguinte, um tradicional método de identificação frontal não é preciso. FEDOROVA et al, 2016 avaliaram novos métodos práticos de identificação frontal no NEB através de campos de temperatura potencial equivalente e sua advecção.

As destruições de bens e vidas humanas causadas pelas chuvas intensas no NEB causam transtornos nas populações da região (MARQUES, 2010), principalmente em função de inundações e deslizamentos de terra. Uma maneira prática de se amenizar o efeito desse problema é ter ciência dos sistemas produtores de precipitações intensas e, a partir daí, desenvolver métodos que possam prognosticar a formação dos processos que dão origem àqueles sistemas. O que não é tarefa fácil, pois a região nordeste do Brasil, que inclui Alagoas, situa-se numa área em que os processos tropicais interagem com os processos das latitudes médias, dificultando a identificação dos sistemas, os quais combinados podem gerar precipitações intensas (PONTES DA SILVA et al., 2011).

O objetivo deste trabalho é identificar a estrutura de sistemas frontais que possuem ligação com a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) no NEB no período de 2008 a 2017, elaborar um padrão de circulação atmosférica e realizar a análise dos fenômenos associados.

2. Metodologia

A área de estudo deste trabalho é a região Nordeste localizada entre as coordenadas geográficas: de Latitude 17.5°S e 2°S e Longitude 48°W e 35°W, (Figura 1).

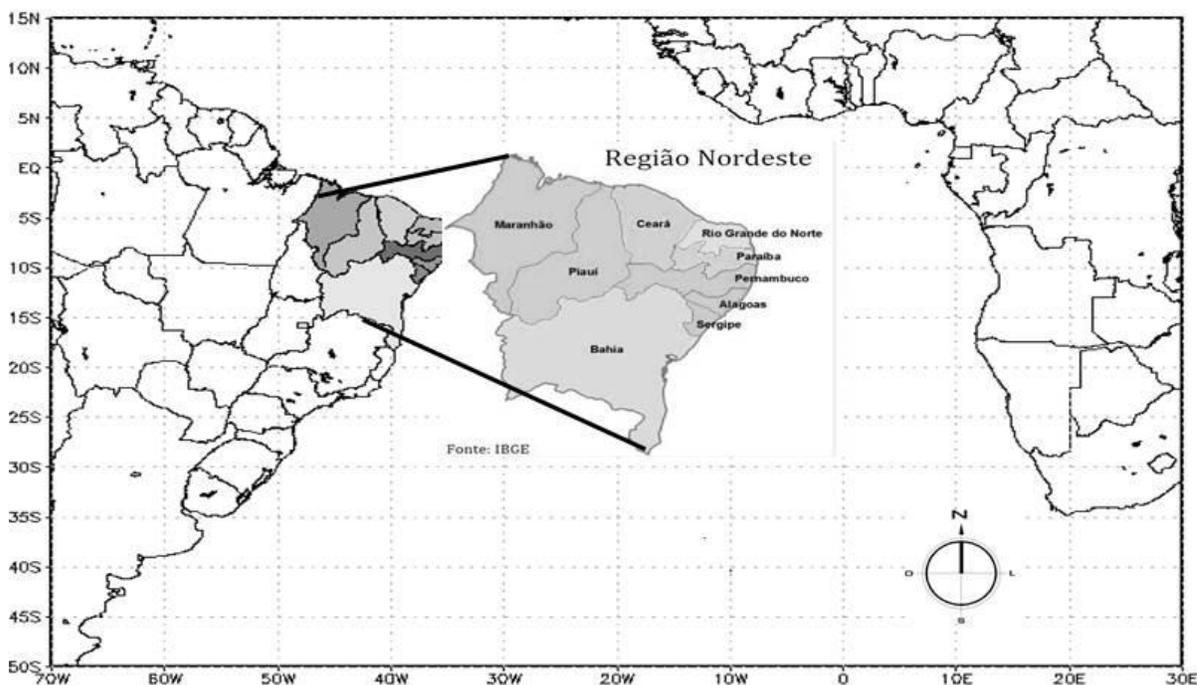


Figura 1 – Caracterização da região de estudo.

Fonte: Adaptado de IBGE (2009).

2.1. Dados utilizados para identificação de frentes frias e ZCIT

Foi utilizado o banco de dados do Climanálise para a identificação dos sistemas frontais até 2014, disponível em <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/>.

A análise de nebulosidade associada à zona frontal e a posição da ZCIT, foi elaborada utilizando-se imagens do satélite geostacionário GOES e METEOSAT, do canal Infravermelho (IR); no banco de dados de imagens da Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (DSA) do período de 2008 à 2017 disponibilizados pelo CPTEC/INPE.

Foram utilizados conjunto de dados das reanálises do European Center of Medium Range Weather Forecast (ECMWF) com resolução espacial 0.125° x 0.125° e temporal de 06h, obtidos através do site <http://www.ecmwf.int/>, para a obtenção dos campos meteorológicos, num domínio de 50°S - 15°N e 70°W - 30°E, para os eventos encontrados no período de estudo (2008 a 2017).

As variáveis consideradas foram a Pressão ao Nível Médio do Mar (PNM), as componentes do vento zonal (u) e meridional (v), temperatura do ar e umidade relativa, nos níveis de 1000 hPa, 500 hPa e 200 hPa. Foram gerados campos derivados, tais como PNM, vorticidade relativa, linhas de corrente e isotacas, advecção de temperatura potencial equivalente, os quais foram visualizados através do software Grid Analysis and Display System (GrADS).

2.2. Identificação das frentes frias

2.3. Identificação frontal por análise operacional

A localização da zona frontal foi identificada pelo método utilizado nas práticas operacionais sinóticas. Esta zona é determinada da seguinte forma: (1) zona "alongada" num cavado de um ciclone baroclínico (por mapas de pressão ao nível da superfície) e vorticidade ciclônica (ao nível de 1000 hPa), (2) zona de confluência de linhas de corrente nos níveis baixos (925 e 850 hPa), (3) localizada entre regiões com advecção de ar quente e frio (níveis de 925 e 850 hPa (PETTERSEN, 1956, BLUESTEIN, 1993, FEDOROVA, 1999; FEDOROVA & CARVALHO, 2000, FEDOROVA et al, 2016). (4) "forte" gradiente de temperatura é geralmente significativa em ordem de grandeza ou maior do que a força da escala sinótica típica de 10 K por 1000 km⁻¹ (ou 10g kg⁻¹ de taxa de mistura de vapor de água por 1000 km) (BLUESTEIN, 1993). Na zona frontal "a temperatura" muda drasticamente na direção horizontal por uma média de 3°C nas regiões subtropicais e 4-5°C nas latitudes médias e nas regiões polares pela definição de TALJAARD (1972). Estes sistemas foram analisados desde a sua formação, durante todo período de deslocamento até atingirem a região de interesse e ligação ou não com ZCIT.

2.3.1. Identificação frontal usando temperatura potencial equivalente

Calculou-se a temperatura potencial equivalente e sua advecção para análise da distribuição e variação horizontal na região, essa metodologia foi utilizada anteriormente pelo Germecki (2005) e Fedorova (2016), eles observaram que a variação de temperatura potencial equivalente na zona frontal (ZF) foi satisfatória na região do NEB. Portanto, uma distribuição horizontal da advecção de (θ_e) foi usada para identificação frontal. Estes parâmetros foram calculados pelas seguintes equações (BOLTON 1980) citada por Fedorova et al., (2016).

$$\theta_e = T_k \left(\frac{1000}{p} \right)^{0.2854(1-0.28 \cdot 10^{-3}r)} \exp \left[\frac{3.267}{T_{lcl}} - 0.00254r(1+0.81 \cdot 10^{-3}r) \right] \quad (1)$$

onde T_k é a temperatura absoluta (K), p pressão atmosférica, r razão de mistura no nível inicial (g kg⁻¹), T_{lcl} a temperatura absoluta no nível de condensação por levantamento (K), calculada pela equação:

$$T_{lcl} = \frac{1}{\frac{1}{T_d - 56} + \frac{\ln(T_k - T_d)}{800}} + 56, \quad (2)$$

$$\text{Adv}\theta_e \equiv -V_H \cdot \nabla_H \theta_e = - \left(u \frac{\partial \theta_e}{\partial x} + v \frac{\partial \theta_e}{\partial y} \right), \quad (3)$$

onde x e y são os componentes do vento (m / s).

Uma onda de calor nos mapas de θ_e (K) à frente da ZF e uma onda de frio de θ_e (K) com um gradiente alto atrás dela têm sido usados como critérios para a identificação de ZF. Além disso, as ZFs foram observadas entre os valores positivos de $\text{Adv}\theta_e$ na frente da ZF e os valores negativos de $\text{Adv}\theta_e$ por trás dele.

2.3 Identificação das ligações da extremidade frontal (EF) com a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT)

Para a identificação da ligação da EF com a ZCIT foram analisadas as seguintes características: 1) Na imagem de satélite foi observada a ligação da banda de nebulosidade associada com a EF e a ZCIT na região do NEB.

2) No campo de vorticidade foram observados valores negativos da vorticidade relativa no ciclone, cavado do ciclone e na ZCIT, no horário em que foi observada a ligação da banda de nebulosidade.

3) No campo da advecção de temperatura potencial equivalente as frentes foram observadas entre os valores positivos de $\text{Adv}\theta_e$ na frente da ZF e os valores negativos de $\text{Adv}\theta_e$ por trás do cavado do ciclone e na ZCIT (FEDOROVA et al, 2016).

2.3.2. Análise dos fenômenos adversos associados

2.3.3. Análise de nevoeiro, névoa úmida e trovoada.

A análise de nevoeiro, névoa úmida e trovoadas foi realizada utilizando dados do METAR das estações meteorológicas localizadas nos estados da Costa Leste do NEB, obtidos no site disponível em: www.redemet.aer.mil.br.

2.5 Análise de precipitação

Para a análise da precipitação foram utilizados dados de estimativa de precipitação por satélite de alta resolução espaço-temporal (8 x 8 km a cada 30 min) do (CMORPH) do *Climate Prediction Center (CPC)* do *National Centers for Environmental Prediction (NCEP)* do *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*, no domínio de 30°S a 10°N e 70°W a 20°W, disponíveis em: <ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov>.

3. Resultados e discussão

3.1 A análise geral

Durante o período de estudo analisado (2008 a 2017), foram registrados 27 sistemas frontais que chegaram até a região do NEB. Dos 27 casos observados somente 5 casos apresentam ligação da EF com ZCIT. Entre os casos sem ligação, 3 tem duração de 2 dias com a menor duração registrada em todos os casos analisados, 5 apresentam duração de 4 dias, 6 com duração de 5 dias, 5 com duração de 6 dias, 2 com duração de 7 dias e 1 com duração de 10 dias com a maior duração registrada entre os casos analisados. Entre os 5 casos com ligação, 3 apresentam a duração de 4 dias, os outros dois com a duração de 5 e 7 dias respectivamente (Tabela 1).

Tabela 1 – Zonas frontais que atingiram a região do NEB durante 10 anos (2008-2017), duração das frentes frias e ligação com ZCIT. N- não, S – sim.

Nº	INÍCIO - FIM	DURAÇÃO	Ligação da EF com ZCIT
1	01-2/06/2008	2 dias	N
2	11-20/09/2008	10 dias	N
3	06-10/10/2008	5 dias	N
4	01-6/12/2008	6 dias	N
5	20-23/08/2009	4 dias	N
6	07-10/04/2010	4 dias	S
7	01-5/06/2010	2 dias	N
8	12-18/08/2010	6 dias	N
9	02-5/06/2011	4 dias	S
10	01-2/09/2011	2 dia	N
11	17-20/10/2011	4 dias	N
12	24-29/09/2012	4 dias	N
13	12-16/08/2013	5 dias	N
14	05-8/10/2013	6 dias	N
15	09-12/05/2014	4 dias	S
16	03-7/09/2014	4 dias	N
17	20-23/09/2014	4 dias	N
18	02-6/10/2014	5 dias	N
19	14-20/11/2014	7 dias	N
20	29/04/2015-04/05/2015	5 dias	S
21	12-17/05/2015	5 dias	N
22	01-5/01/2016	5 dias	N
23	28/03/2017-03/04/2017	7 dias	N
24	16-22/05/2017	7 dias	S
25	01-4/09/2017	6 dias	N
26	31/10/2017-04/11/2017	5 dias	N
27	10-16/11/2017	6 dias	N

Fonte: Autor 2018.

Na Tabela 2 observa-se o período de estudo e as estações do ano. Pode ser observado que a maioria dos episódios de frentes ocorrem entre os meses de Agosto, Setembro e Outubro, registrando 13 casos. A estação de verão apresenta o menor número de casos, somente 2. Os casos observados com ligação com ZCIT ocorrem nos meses de Abril e Maio, com exceção do caso que ocorre em junho.

Tabela 2 – Número de ocorrências de frente frias no Nordeste do Brasil no período de 2008 a 2017. Quadrados cinzas – casos com ligação da EF com ZCIT.

Período	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	Total
2008	1						1			1	1		4
2009									1				1
2010					1		1		1				3
2011							1			1	1		3
2012										1			1
2013									1		1		2
2014						1				2	1	1	5
2015					1	1							2
2016		1											1
2017					1	1		1		1		2	6
total/mês	1	1	0	0	2	4	3	1	3	6	4	3	27
Casos com ligação	0	0	0	0	1	3	1	0	0	0	0	0	5
Estações do ano	Verão		Outono			Inverno			Primavera				

Fonte: Autor 2018.

Foram selecionados dois casos de frente fria que atingiram a região do NEB para o estudo detalhado, o critério de escolha dos dois casos baseou-se nos casos melhor vistos nos campos de vorticidade relativa e advecção de temperatura potencial equivalente. Dentre os dois casos escolhidos para o estudo detalhado, um caso de frente fria com ligação com ZCIT ocorreu no dia 10/04/2010 e o outro sem essa ligação ocorreu no dia 15/05/2015. Foram analisados vários campos sinóticos tais como: Pressão a nível médio do mar (hPa), linhas de corrente em vários níveis (1000, 500 e 200 hPa). No trabalho estão apresentados somente os campos de vorticidade relativa, advecção de temperatura potencial equivalente, precipitação acumulada e imagens de satélite no canal infravermelho.

3.2. Frente fria com ligação com a ZCIT

3.2.1. Frente fria na imagem de satélite e no campo da Vorticidade relativa.

Através da análise da imagem de satélite entre os dias 08, 10 e 11/04/2017 (Figura 2), observa-se a evolução da banda de nebulosidade da frente fria e o seu deslocamento para o norte da região no NEB até a sua junção com a banda da nebulosidade da ZCIT. O campo da vorticidade relativa mostrou o centro do sistema mais intenso ($-12S^{-1}$) localizado a $30^{\circ}S$, ao longo do cavado associado a frente fria a máxima vorticidade observada durante a ligação é de $-6S^{-1}$ (Figura 2e).

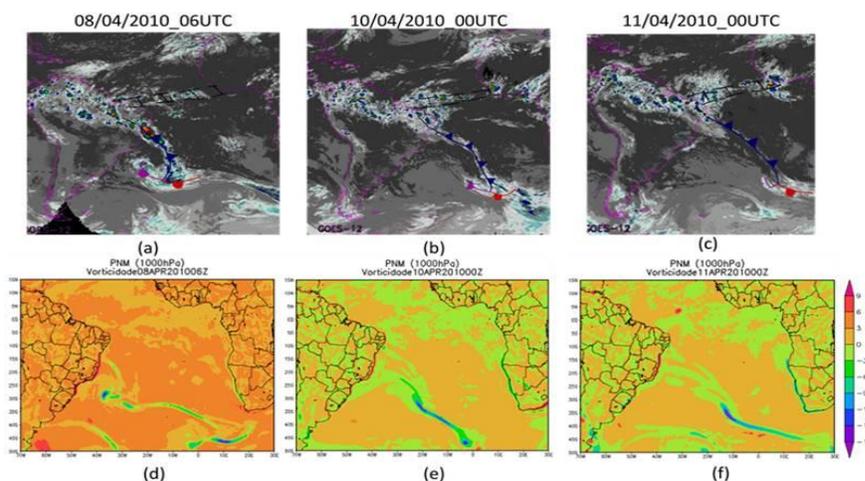


Figura 2 – Imagens de Satélite no canal infravermelho (a, b, c) e vorticidade relativa (S^{-1}) (d, e, f) dos dias 08, 10 e 11/04/2010.

Fonte: Autor (2018).

3.2.2. Frente fria nos campos de temperatura potencial equivalente e precipitação.

Na Figura 3 pode-se observar os campos da advecção de temperatura potencial equivalente e a precipitação acumulada (mm/24h). O campo de advecção de temperatura potencial equivalente em baixos níveis (1000hPa), pode-se observar a advecção fria com valor de (-8 k/6h) na retaguarda da frente fria e advecção quente (6 k/6h) na vanguarda (figura 3 b), neste dia foi observada a ligação da banda de nebulosidade da extremidade frontal com a ZCIT.

A precipitação acumulada em 24 horas nos dias 8 e 10/04/2010 apresenta-se acima de 350 mm na região do NEB (Figura 3 d, 3e). No dia 08/04/2010 observa-se precipitações ao longo da frente fria (Figura 3 d), e no dia em que observa-se a ligação (10/04/2010), as precipitações se concentram em maior quantidade na costa Leste do NEB (Figura 3-e).

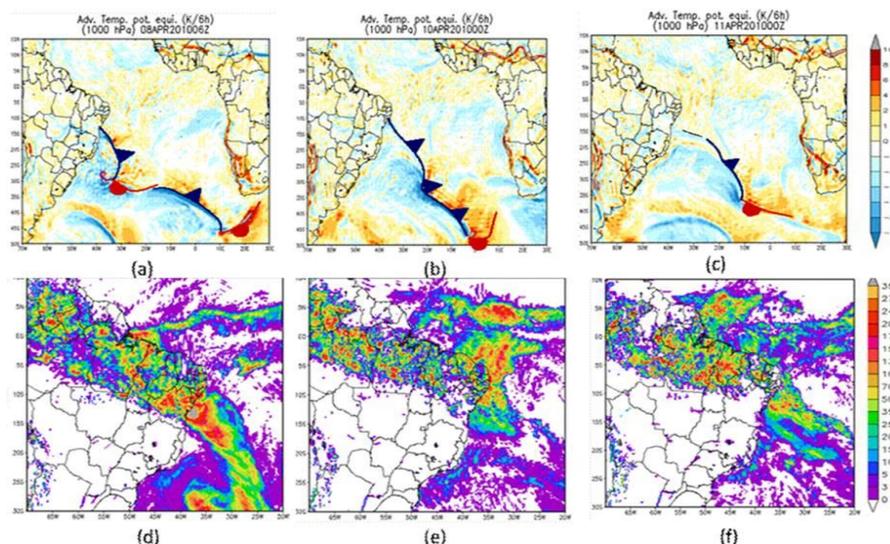


Figura 3 – Campo de advecção de temperatura potencial equivalente ($k/6h$) em baixos níveis (1000hPa) (a, b, c) e precipitação acumulada 24h para os dias 08, 10 e 11/04/2010 (c, d, f).

Fonte: Autor (2018).

No campo de linhas de corrente em altos níveis (200 hPa), na região do NEB mostrou circulação anticiclônica, e a corrente de jato subtropical posicionada mais ao sul da América do Sul (17,5°S), sem influencia no NEB.

4. Frente fria sem ligação com a ZCIT

Neste item será descrito em detalhes um evento sem ligação da EF com ZCIT.

Os campos na Figura 4 mostram o caso de frente fria do dia 15/05/2015. Através da imagem de satélite é possível observar a banda de nebulosidade associada à frente fria no sul do nordeste (Figura 4 a), durante a sua evolução a frente fria atingiu o Estado de Sergipe. A banda de nebulosidade da ZCIT esteve posicionada mais ao norte (5°N) durante a atuação da frente fria no NEB.

Durante a evolução do sistema sua intensidade variou entre -3 à -6 S⁻¹ (Figura 4 d, e, f). Com o bloqueio da alta subtropical e o enfraquecimento do cavado na costa leste do NEB (observada no campo de pressão), a frente fria iniciou o seu processo de dissipação no dia 17/05.

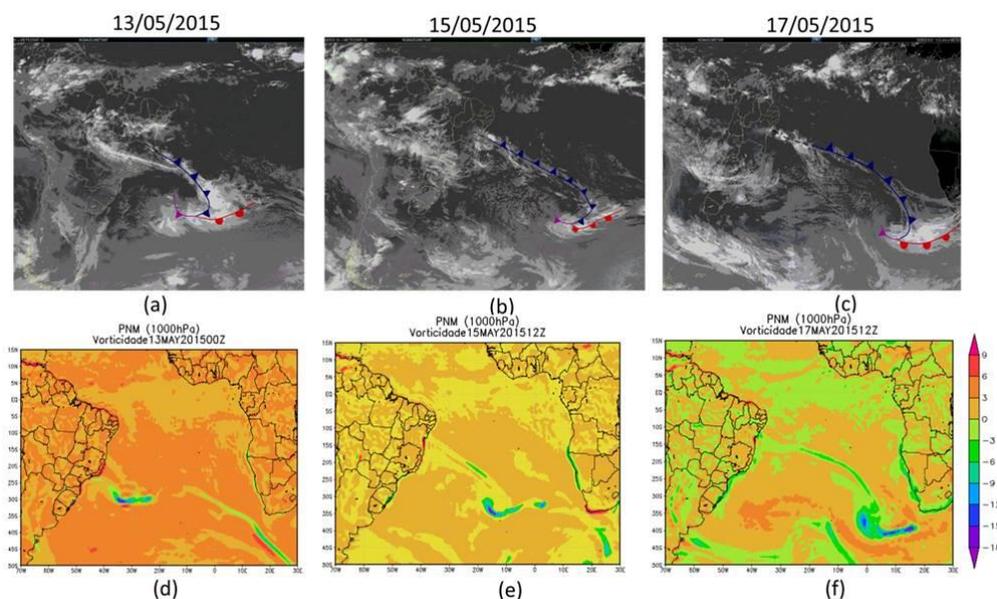


Figura 4 – Imagens de Satélite no canal infravermelho (a, b, c) e vorticidade relativa (S⁻¹) nos dias 13, 15 e 17/05/2010 (d, e, f).

Fonte: Autor (2018).

A figura 5 mostra o campo de advecção de temperatura potencial equivalente e a precipitação acumulada, nota-se a presença de advecção fria na retaguarda da frente fria (-8K/6h) e advecção quente na vanguarda (6K/6h) (Figura 5 a). Durante a evolução do sistema, é possível observar o seu deslocamento para a região do NEB. No dia 15/05 às 12Z (Figura 5 b) é possível observar a advecção fria na região sul do Sergipe com advecção fria de -10K/6h, a máxima advecção fria registrada ao longo da trajetória da frente fria, e na vanguarda do sistema frontal mostrou advecção quente (4K/6h). O campo da advecção mostrou que a frente fria não atingiu o estado de Alagoas, a advecção fria se limitou somente até a região sul do Sergipe. Na região da ZCIT, a advecção quente não teve uma variação significativa, apresentando valor aproximado a 4K/6k (Figura 5).

A precipitação acumulada em 24 h foi observada ao longo da frente fria, com a máxima acumulada acima de 200 mm na região do Sergipe (Figura 5 f).

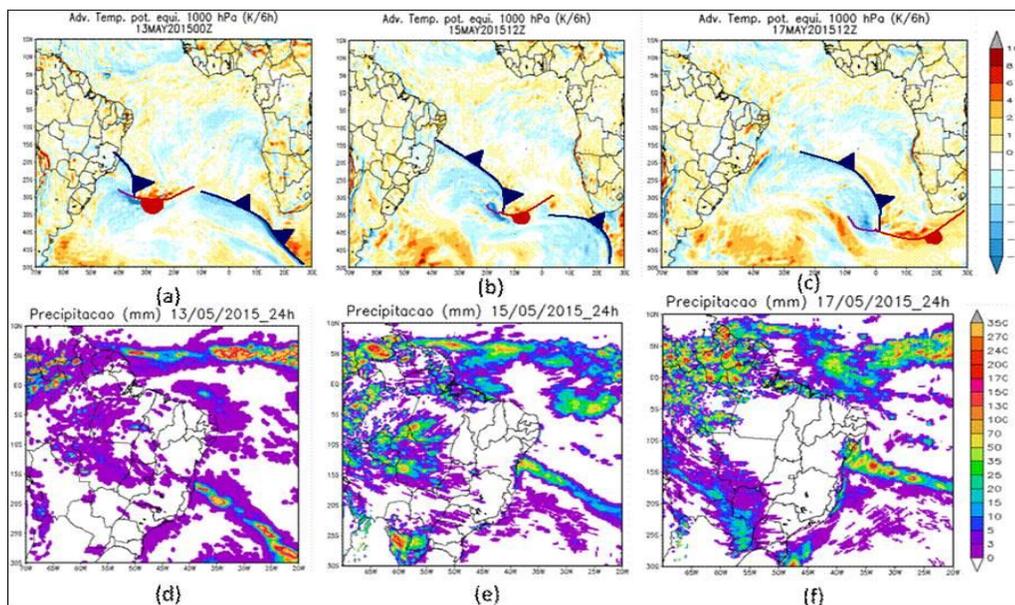


Figura 5 – Advecção de temperatura potencial equivalente (K/6h) do reanálise ERA-Interim de 00Z de 13/05 (a), 12Z de 15/05 (b), 12Z de 17/05 (c), e precipitação acumulada dos dias 13/05 (d), 15/05 (e) e 17/05 (f), do ano de 2015. Fonte: Autor (2018).

4.1. Circulação em altos níveis de casos típicos com ligação da EF com ZCIT e sem essa ligação.

Este padrão de circulação em altos níveis (200 hPa) observada na Figura 6 foi vista em todos os casos típicos com ligação da EF com ZCIT (a) e sem essa ligação (b), destacando posição da CJST e circulação no NEB. Em casos com ligação na região do NEB sem influencia da CJST, circulação anticiclônica em (200 hPa) e registros de chuvas intensas em todos os casos, como mostra o exemplo do caso com ligação (Figura 3 d, e, f) e nos casos sem essa ligação, com influencia da saída de CJST no NEB, circulação ciclônica em (200 hPa) e sem registro de chuvas fortes no NEB, exemplo da Figura 5 e.

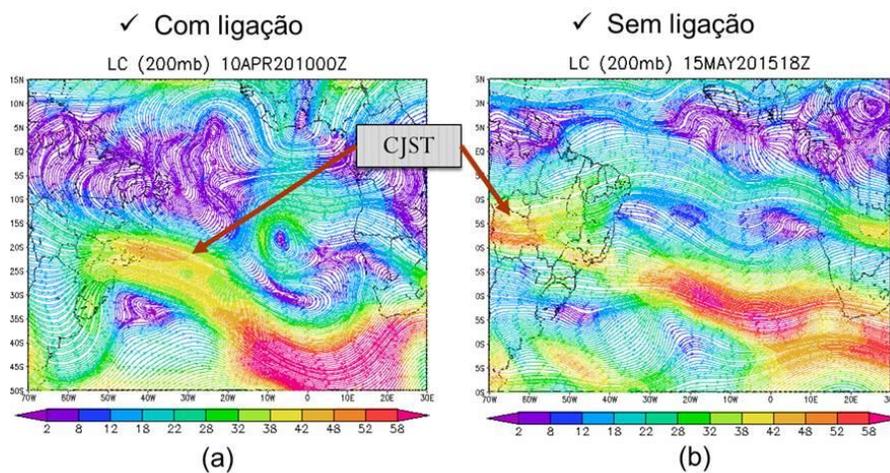


Figura 5 – Advecção de temperatura potencial equivalente (K/6h) do reanálise ERA-Interim de 00Z de 13/05 (a), 12Z de 15/05 (b), 12Z de 17/05 (c), e precipitação acumulada dos dias 13/05 (d), 15/05 (e) e 17/05 (f), do ano de 2015. Fonte: Autor (2018).

4.2. Comparações dos eventos com ligação da zona frontal com ZCIT e sem esta ligação.

Quatro casos com a ligação da extremidade frontal com ZCIT mostraram a estrutura de correntes semelhante. No quinto caso com esta ligação foi presente VCAN. As diferenças na estrutura das correntes serão descritas a seguir. Nota-se a pequena variação da posição da ZCIT (0 a 3°S) na costa do Brasil nos 5 casos (Figura 7 a, b, c, d). Em altos níveis em 4 casos foi a circulação anticiclônica e influência de CJS entre 16° a 25°S. Os centros dos ciclones associados aos sistemas frontais que tiveram ligação com ZCIT foram observados na longitude 20°W variando somente na latitude, entre 35°S a 20°S. O caso da ligação da frente fria com ZCIT na presença do VCAN (Figura 7 e) seguiu o padrão dos outros 4 casos em relação ao posicionamento da e ZCIT.

Os casos sem ligação mostraram presença de corrente de jato subtropical no NEB influenciando no tempo na região (somente um caso esta mostrado na Figura 7 f com bifurcação na corrente de jato). Esta não foi visto no NEB em todos os casos com ligação da frente com ZCIT.

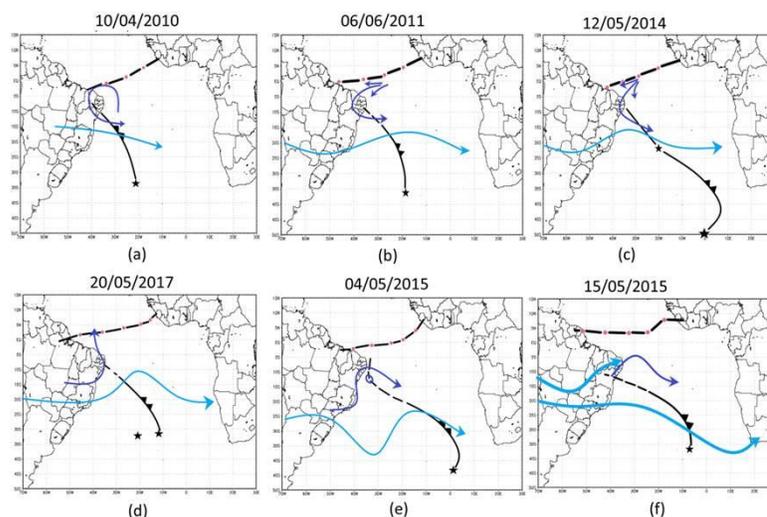


Figura 7 – Modelo conceitual da estrutura da Atmosfera em vários níveis dos casos com ligação da extremidade da FF com ZCIT e um caso sem essa ligação. Linhas: azul escuro – circulação em altos níveis; azul claro – corrente de jato em altos níveis; preta descontínua pontilhada – posição da zona de convergência intertropical; estrela centro do ciclone.

Fonte: Autor (2018).

4.3. Características dos eventos com ligação da zona frontal com ZCIT

As características de 5 casos com ligação da zona frontal com ZCIT são apresentadas na tabela 3. Esta tabela mostra valores máximos da vorticidade relativa (S^{-1}) no centro do ciclone, no cavado do ciclone associado à FF, advecção de (θ_e) ($K/6h$) na região de interesse (onde é observada ligação da banda de nebulosidade da extremidade frontal com ZCIT), posição do ciclone no momento da ligação dos dois sistemas e a circulação do vento em altos níveis (200 hPa).

As imagens de satélite mostraram ligação de nebulosidade da extremidade frontal com a ZCIT em todos 5 casos. 4 (quatro) casos mostraram mesmos valores da vorticidade relativa no cavado ($-5 S^{-1}$) durante a ligação (II., III., IV. e V. respectivamente), com exceção do caso I, que mostrou maior intensidade com vorticidade relativa igual a $-10 S^{-1}$. A vorticidade no centro dos ciclones associados aos cavados das frentes frias, sua intensidade variou entre -25 a $-15 S^{-1}$. A advecção de theta na região da ligação dos dois sistemas variou entre -6 a $-5 K/6h$.

4.3.1. Condições da união ou não da zona frontal com ZCIT

4.3.2. Condições da união da zona frontal com ZCIT

Padrões da circulação da troposfera na região do NEB foram estabelecidos para auxiliar na previsão de sistemas frontais e, sequentemente de tempo, na região (Figura 6). Uma das condições principais da penetração das frentes na região do NEB foi a posição da corrente de jato subtropical.

As principais características da circulação propícias para entrada das frentes no NEB e ligação com ZCIT são seguintes:

- 1 – Ausência da influência da corrente de jato subtropical (CJS) no NEB o que possibilita entrada de sistemas frontais para o norte do NEB;
- 2 – Predominância de circulação anticiclônica em altos níveis na região do NEB, que desloca a corrente de jato subtropical para o sul da América do Sul;
- 3 - Bem conhecida ligação das VCAN do tipo clássico (GAN & KOUSKY, 1986) com zonas frontais ajuda na penetração das frentes no NEB.

4.3.3. Condições para um sistema frontal não alcançar o norte do NEB

- 1 – Influência da corrente de jato subtropical (CJS) no NEB impossibilita entrada de sistemas frontais para o norte do NEB;
- 2 - Circulação ciclônica em altos níveis (200 hPa) bloqueia a penetração de frentes na região.

4.3.3.1. Análises dos fenômenos associados aos eventos da ligação da zona frontal com ZCIT.

As estações meteorológicas registraram chuva forte e névoa úmida em todos os eventos (Tabela 2). O nevoeiro, as nuvens stratus e trovoadas não foram observados em nenhuma estação.

Tabela 2 – Dados de chuva e fenômenos meteorológicos nos eventos com ligação da extremidade frontal com ZCIT.
+RA - chuva forte; BR - Névoa Úmida.

Datas	Chuva	Névoa Úmida	Stratus	Nevoeiro	Trovoadas
10/04/2010	+RA	BR	-	-	-
06/06/2011	+RA	BR	-	-	-
12/05/2014	+RA	BR	-	-	-
04/05/2015	+RA	BR	-	-	-
20/05/2017	+RA	BR	-	-	-

Fonte: Autor (2018).

O caso com chuva extrema ocorreu no mês de maio de 2017, registrando um acumulo de precipitação acima dos 350 mm entre os dias 25 à 28/05/2017, provocando inundações e deslizamentos de terra. Essa precipitação associada a extremidade frontal e a ZCIT no NEB causou vários prejuízos na região segundo a Defesa civil de Alagoas (<https://g1.globo.com/al/alagoas/noticia/chuvas-fortes-causam-deslizamentos-de-barreiras-e-deixam-mortos-e-feridos-em-maceio.ghtml>)

5. Considerações finais

Zonas frontais sobre o NEB foram observadas entre 2008 a 2017, com maior frequência entre os meses de Setembro, Outubro e novembro. Durante o período de estudo foram observados 27 casos de frentes frias. Entre estes casos em 5 (cinco) casos de frente fria tiveram ligação com a ZCIT Os casos com ligação foram observados nos meses de Abril, Maio e Junho.

Foi feito um estudo detalhado dos eventos de frente fria, desde a formação, deslocamento até alcançar a região norte do NEB. As imagens de satélite mostraram ligação de nebulosidade da extremidade frontal com a ZCIT em 5 (cinco) casos. A análise sinótica feita mostrou em 4 (quatro) casos mesmos valores da vorticidade relativa no cavado (-5 S^{-1}) e um caso mostrou vorticidade relativa no cavado -10 S^{-1} . A vorticidade no centro dos ciclones associados aos cavados das frentes

frias com ligação com ZCIT tinha sua intensidade entre -25 S^{-1} a -15 S^{-1} . A advecção de temperatura potencial equivalente (θ_e), na retaguarda da extremidade frontal na região do NEB apresentou valores entre -6 a -5 K/6h , e na vanguarda apresentou valores entre 2 a 6 K/6h , em todos os casos com ligação da extremidade frontal com ZCIT.

A estrutura da troposfera nos casos de frente fria com ligação com ZCIT foi determinada da seguinte forma:

- Em 5 casos notou-se uma pequena variação na posição da ZCIT em torno de 0 a 3°S na região do NEB, observada pela confluência dos alísios de nordeste e de sudeste em baixos níveis (1000 hPa);
- Os centros dos ciclones associados aos sistemas frontais com ligação com ZCIT foram localizados na longitude 20°W variando somente na latitude, entre 35°S e 20°S ;
- Foi observada confluência dos ventos na extremidade das frentes frias na região do NEB contribuindo na convecção na região da ligação da frente fria com ZCIT;
- Em altos níveis (200 hPa) 4 casos apresentaram circulação anticiclônica e em um caso foi circulação ciclônica. A corrente de jato subtropical nos 5 (cinco) casos foi localizada mais ao sul (16° a 25°S) da América do Sul, não influenciando a região do NEB.

Foram elaborados os padrões da troposfera nas situações da união ou não da zona frontal com ZCIT. Esses padrões foram estabelecidos para auxiliar na previsão de sistemas frontais e sequentemente de tempo na região do NEB. Esses padrões foram baseados nas diferenças apresentadas entre os casos de frente fria com união com ZCIT e sem união, os padrões são:

I. União da extremidade frontal com ZCIT

- 1 – posição da corrente de jato subtropical aproximadamente no sudoeste do Brasil, sem influência na região do NEB;
- 2 – Circulação anticiclônica em altos níveis (200 hPa) no NEB, contribuindo no deslocamento da Corrente de jato subtropical no sudoeste do Brasil, permitindo o deslocamento das frentes frias para o norte do NEB.

II. Sem união da extremidade frontal com ZCIT

- 1 – Posição da corrente de jato subtropical no NEB, com influência na região;
- 2 – Circulação ciclônica em altos níveis (200 hPa) na região do NEB, contribuindo no deslocamento da corrente de jato para a região do NEB, bloqueando a entrada de sistemas frontais para o norte do NEB.

Fenômenos adversos foram identificados nos eventos com ligação da frente fria com a ZCIT. Em todos os eventos foram observados névoa úmida e chuva forte na região do NEB. Trovoadas, stratus não foram observados nas estações meteorológicas do NEB. Em destaque o evento de ligação da zona frontal com ZCIT, registrou precipitações acima de 350 mm entre os dias 25 à 28/05/2017. Durante a permanência da extremidade despreendida da frente fria na região do NEB, foram registrados inundações em vários pontos de Alagoas e deslizamentos de terra, provocando destruições de bens matérias e casou 4 mortos.

Referências

- BLUESTEIN, H. B.. Observations and theory of weather systems. In: Synoptic Dynamic Meteorology in Midlatitudes. Oxford: Oxford University Press, V. 2, 595p, 1993.
- COELHO, M. S.; GAN, M. A.; Conforte J. C. Estudo da variabilidade da posição e da nebulosidade associada à ZCIT do Atlântico, durante a estação chuvosa de 1998 e 1999 no Nordeste do Brasil. Revista Brasileira de Meteorologia, 19, p. 23-34, 2004.
- FEDOROVA N., LEVIT V., CRUZ C. D. On Frontal Zone Analysis in the Tropical Region of the Northeast Brazil. Pure Appl. Geophys. 2016, 173 p 1403-1421, DOI 10.1007/s00024-015-1166-y.
- FEDOROVA, N. Meteorologia Sinótica. V.1, Pelotas. Editora e Gráfica Universitária - UFPel, 259 pp. 1999.
- FEDOROVA, N.; CARVALHO, M. H.. Processos sinóticos em anos de La Niña e de El Niño. Parte II: Zonas Frontais. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 15, n. 2, p. 57-72, 2000.
- GAN, M. A., KOUSKY, V. E. Vórtices Ciclônicos da alta troposfera no Oceano Atlântico sul. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 1, p.19-28. 1986.

GEMIACKI, L.. Atuação de Sistemas Frontais na Estação Seca do Nordeste do Brasil. 2005. (MET-UFAL-MS-035). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2005.

HASTENRATH, S., 1984: Interannual variability and annual cycle: mechanisms of circulation and climate in the tropical Atlantic. *Mon. Wea. Rev.*, 112, 1097-1107. HASTENRATH, S., HELLER, L., 1977. Dynamics of climate hazards in Northeast Brazil. *Quart. J. Roy. Meteorological Society*, v. 103, 77-92.

HASTENRATH, S.: *Climate dynamics of the tropics*. Updated ed. from *Climate and Circulation of the Tropics*. Kluwer Academic Publishers, 1991. 488p

MARQUES DA SILVA, Richarde et al. Análise da variabilidade espaço-temporal e identificação do padrão da precipitação na bacia do rio Tapacurá, Pernambuco. **Sociedade & Natureza**, v. 22, n. 2, 2010.

MOURA, A. D., SHUKLA, J., 1981. On the dynamics of droughts in the Northeast Brazil: Observations, theory and numerical experiments with a general circulation model., *Journal of Atmospheric Sciences*, v. 38, n.12, 2653 – 2675.

PONTES DA SILVA B. F., FEDOROVA N., LEVIT V., PERESETSKY A. 2011: Sistemas sinóticos associados às precipitações intensas no Estado de Alagoas *Revista Brasileira de Meteorologia* 26-3: 295–310.

RODRIGUES, M. L. G.; FRANCO, D.; SUGAHARA, S. Climatologia de frentes frias no litoral de Santa Catarina. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 22, n. 2, p. 135–151, ago. 2004.

SCHEUER, Piter Rafael, et al. Sistemas Frontais Associados a Zona de Convergência do Atlântico Sul. 2017.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. Meteorologia básica e aplicações. Viçosa: UFV, 1991. 449p.

BIBLIOGRAFIAS CONSULTADAS

(<https://g1.globo.com/al/alagoas/noticia/chuvas-fortes-causam-deslizamentos-de-barreiras-e-deixam-mortos-e-feridos-em-maceio.ghtml>).

(http://gazetaweb.globo.com/portal/noticia/2017/05/volume-de-chuvas-em-maceio-para-o-mes-de-maio-e-o-maior-em-quatro-anos_33963.php).