



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
CURSO DE MESTRADO EM METEOROLOGIA

ALAERTE DA SILVA GERMANO

**ASPECTOS SINÓTICOS DE VÓRTICES CICLÔNICOS EM ALTOS NÍVEIS
QUE PROVOCARAM PRECIPITAÇÕES EXTREMAS NAS CIDADES DE
RECIFE, MACEIÓ E ARACAJU NO PERÍODO DE 2011 À 2015:
ESTUDO DE CASOS**

MACEIÓ, ALAGOAS, BRASIL
AGOSTO DE 2016

ALAERTE DA SILVA GERMANO

**ASPECTOS SINÓTICOS DE VÓRTICES CICLÔNICOS EM ALTOS NÍVEIS
QUE PROVOCARAM PRECIPITAÇÕES EXTREMAS NAS CIDADES DE
RECIFE, MACEIÓ E ARACAJU NO PERÍODO DE 2011 À 2015:
ESTUDO DE CASOS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Alagoas - UFAL, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Meteorologia.

Área de concentração: Processos de Superfície Terrestre

Orientador:

Prof. Dr. Ricardo Ferreira Carlos de Amorim

MACEIÓ, ALAGOAS, BRASIL

AGOSTO DE 2016



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

CERTIFICADO DE APRESENTAÇÃO

N.º de ordem: MET-UFAL-MS-138.

*"ASPECTOS SINÓTICOS DE VÓRTICES CICLÔNICOS EM ALTOS NÍVEIS QUE
PROVOCARAM PRECIPITAÇÕES EXTREMAS NAS CIDADES DE RECIFE, MACEIÓ E
ARACAJU, NO PERÍODO DE 2011 A 2015: ESTUDO DE CASOS."*

Alaerte da Silva Germano

Dissertação submetida ao colegiado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Alagoas - UFAL, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Meteorologia.

Aprovado pela Banca Examinadora composta por:

Prof. Dr. Ricardo Ferreira Carlos de Amorim
(Orientador)

Prof. Dr. Heliofábio Barros Gomes
(Membro Interno)

Profa. Dra. Maria Luciene Dias de Melo
(Membro Interno)

Prof. Dr. Washington Luiz Félix Correia Filho
(Membro externo/UFRN)

agosto/2016

AGRADECIMENTOS

O agradecimento inicial vai para minha família, pelo apoio e investimento na minha educação.

Ao meu Orientador, Professor *Dr. Ricardo Ferreira Carlos de Amorim*, pela paciência, confiança e amizade, pois é o melhor orientador que alguém poderia ter.

Aos amigos *Leandro Duarte, Cesar Eloi, Pedro Bomba, Bruno Malta, Erick Rubens e Renato Buarque*, pelo companheirismo, bons conselhos e pelas noitadas de UFC.

Aos meus Professores, *Dra. Luciene Melo, Dr. Frederico Tejo Di Pace, Ms. Clênio Ferreira, Ms. Hélio Soares Gomes, Dr. Heliofabio Barros Gomes e Dr. Rosiberto Salustiano*, por todo o ensinamento e contribuição na minha formação acadêmica.

Aos amigos da Meteorologia, *Thays Paes, Ismael Guidson, Sâmara Santos, Jorge Fernando, Giuliano Carlos, Jeová Junior, Jéssica Rodrigues, Washington Correia, Thomas Rocha, David Duarte e Juliete Baraúna*.

Ao ICAT-UFAL por todo o acolhimento e à Meteorologia em si, pois é uma ciência a qual aprendi a amar. E como diria *Darth Vader*: “antes eu era apenas um aprendiz, hoje eu sou um mestre”.

Às minhas bandas preferidas, que tanto ouvi durante o desenvolvimento deste trabalho: *Iron Maiden, KISS, AC/DC, Foo Fighters, Led Zeppelin, Motörhead, Guns N' Roses, Nirvana e Alanis Morissette*.

À todas as pessoas que, de uma forma ou de outra, contribuíram na minha formação acadêmica e moral.

“...O que torna a vida valiosa é que ela não dura para sempre, o que a faz preciosa é a sua finitude. Agora eu sei disso mais do que nunca e digo isso num dia como o de hoje, para nos lembrar de que tempo é sorte. Então, não desperdice vivendo a vida dos outros, deixem a sua contribuição, lute por tudo que é importante para vocês, não importa a que custo, porque mesmo se falharmos, existe maneira melhor de se viver?”

Gwen Stacy/Emma Stone (2014)

O Espetacular Homem Aranha 2, SONY PICTURES

RESUMO

Este trabalho teve o objetivo de caracterizar aspectos sinóticos de casos de Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis (VCAN) que provocaram precipitações extremas nas cidades de Recife, Maceió e Aracaju durante o período de 2011 à 2015. Para análise e compreensão dos aspectos sinóticos dos casos de VCANs foram utilizados dados de precipitação diária, imagens de satélites, reanálises do NCEP/NCAR e radiossondagens. Com os dados de precipitação diária, foi utilizado a técnica dos percentis e considerou-se como um evento de precipitação extrema (EPE) o valor igual ou superior ao percentil 95. Com o valor obtido, identificou-se a quantidade e variabilidade dos EPE ocorridos entre Janeiro de 2011 e Dezembro de 2015 na área de estudo. Selecionou-se os EPE ocorridos durante a temporada de VCANs (Novembro à Março) e, através das análises de imagens de satélites juntamente com os campos de linhas de corrente em altos níveis (200hPa) pôde-se identificar quantos dos EPE ocorridos de Novembro à Março foram provocados por VCAN. Foi constatado a ocorrência de 6 casos de VCANs, esses casos provocaram: 46,6% dos EPE na cidade de Recife (7 de 15), 60% dos EPE na cidade de Maceió (3 de 5) e 66,6% dos EPE na cidade de Aracaju (2 de 3). Os VCANs denominados 1, 4 e 6 se formaram pelo mecanismo da Formação Africana I e mostraram uma tendência de serem mais duradouros, permanecendo ativos entre 9 à 16 dias. Os VCANs 2 e 3 se formaram pelo mecanismo Clássico e o VCAN 5 formou-se pelo mecanismo de Formação Alta. Os casos de VCANs mais duradouro, variando entre 9 e 16 dias, ocorreram nos meses de Dezembro, Janeiro e Fevereiro e, os menos duradouros, com média de 2 dias, ocorreram nos meses de Novembro e Março. O campo de vorticidade relativa mostrou ser um excelente mecanismo para se prever, em escalas de horas, tanto o surgimento quanto a desconfiguração do VCAN.

Palavras-Chave: VCAN, precipitação, vorticidade relativa, dissipação

ABSTRACT

This study aimed to characterize synoptic aspects of Upper Tropospheric Cyclonic Vortices (UTCV) cases that caused extreme rainfall in the cities of Recife, Maceió and Aracaju during the period 2011 to 2015. For analysis and understanding of the synoptic aspects of UTCV cases daily rainfall data were used satellite images, the NCEP / NCAR and radiosondes. With the data of daily rainfall, the percentiles technique was used and it was considered as an extreme rainfall event (ERE) value equal to or above the 95th percentile with the obtained value, identified the amount and variability of proceedings ERE between January 2011 and December 2015 in the study area. Was selected the ERE occurred during the season UTCV (November to March) and through satellite image analysis along with the current line fields at high levels (200 hPa) it was possible to identify how many of ERE occurred November to March were caused by UTCV. The occurrence of 6 UTCV cases was found, these cases caused: 46.6% of ERE in the city of Recife (7 of 15), 60% of ERE in Maceió (3 of 5) and 66.6% of ERE in the city of Aracaju (2 of 3). The CVHL denominated 1, 4 and 6 formed by the African Formation I mechanism and showed a tendency to be more durable and remain active from 9 to 16 days. The UTCV 2 and 3 formed by the Classic mechanism and UTCV 5 formed the Formation High mechanism. The UTCV cases of more lasting, ranging between 9 and 16 days, occurred in the months of December, January and February, and the less durable, averaging two days, occurred in the months of November and March. The field relative vorticity proved an excellent mechanism to provide, in time scales, both the onset and the mangling of UTCV.

Keywords: UTCV, rainfall, relative vorticity, dissipation

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Sequência esquemática do primeiro modelo conceitual para a formação de Vórtices Ciclônicos em 200 hPa no Atlântico Sul..... | 22 |
| Figura 2 – Esquema de um sistema frontal desenvolvido. Linhas inteiras: Isóbaras..... | 23 |
| Figura 3 – Mapa mostrando a localização da área de estudo (1, 2 e 3) na América do Sul..... | 30 |
| Figura 4 – Esquematização das etapas para identificação e seleção dos casos de VCANs para estudo..... | 36 |
| Figura 5 – Precipitação média mensal durante e número total de eventos de precipitação extrema (EPE) em cada mês, durante 1986 à 2015, para a cidade de Recife..... | 37 |
| Figura 6 – Precipitação média mensal durante e número total de eventos de precipitação extrema (EPE) para cada mês, durante 1986 à 2015 para a cidade de Maceió..... | 38 |
| Figura 7 - Precipitação média mensal durante e número total de eventos de precipitação extrema (EPE) para cada mês, durante 1986 à 2015 para a cidade de Aracaju..... | 39 |
| Figura 8 – Posição e deslocamento dos 6 casos de VCANs que provocaram precipitações extremas nas cidades de Recife, Maceió e Aracaju durante 2011 à 2015..... | 47 |
| Figura 9 – Linha de corrente e vorticidade relativa no nível de 200hPa para às 12:00 UTC do dia 14 de Fevereiro de 2011..... | 49 |
| Figura 10 – Linha de corrente e vorticidade relativa no nível de 200hPa para às 12:00 UTC do dia 20 de Fevereiro de 2011..... | 49 |
| Figura 11 – Linha de corrente e vorticidade relativa no nível de 200hPa para às 12:00 UTC do dia 21 de Fevereiro de 2011..... | 50 |
| Figura 12 – Água precipitável (mm) para às 12:00 UTC do dia 14 de Fevereiro de 2011..... | 51 |
| Figura 13 – Imagem composta dos satélite GOES-12 + METEOSAT-09 no canal espectral infravermelho para às 18:00 UTC do dia 14 de Fevereiro de 2011. Círculo em azul simboliza a localização aproximada do vórtice ciclônico em 200hPa..... | 51 |

| | |
|--|----|
| Figura 14 – Precipitação diária na área de estudo (Recife, Maceió e Aracaju) durante o período de vida do VCAN-1, de 12 a 21 de Fevereiro de 2011..... | 52 |
| Figura 15 – Campo composto de linha de corrente e vorticidade relativa no nível de 200hPa para às 12:00 UTC do dia 15 de Janeiro de 2012..... | 53 |
| Figura 16 – Campo composto de linha de corrente e vorticidade relativa no nível de 200hPa para às 12:00 UTC do dia 20 de Janeiro de 2012..... | 54 |
| Figura 17 – Imagem composta dos satélite GOES-12 + METEOSAT-09 no canal espectral infravermelho para às 12:00 UTC do dia 20 de Janeiro de 2012. Círculo em azul simboliza a localização aproximada do vórtice ciclônico em 200hPa..... | 55 |
| Figura 18 – Água precipitável (mm) para às 12:00 UTC do dia 20 de Janeiro de 2012..... | 55 |
| Figura 19 – Campo composto de linha de corrente e vorticidade relativa no nível de 200hPa para às 12:00 UTC do dia 28 de Janeiro de 2012..... | 56 |
| Figura 20 – Precipitação diária (24h) na área de estudo (Recife, Maceió e Aracaju) durante o período de vida do VCAN-2, de 15 à 28 de Janeiro de 2012..... | 57 |
| Figura 21 – Linhas de corrente e vorticidade relativa no nível de 200hPa para às 06:00 UTC do dia 02 de Novembro de 2013..... | 58 |
| Figura 22 – Linhas de corrente e vorticidade relativa no nível de 200hPa para às 00:00 UTC do dia 03 de Novembro de 2013..... | 59 |
| Figura 23 – Linhas de corrente e vorticidade relativa no nível de 200hPa para às 00:00 UTC do dia 04 de Novembro de 2013..... | 60 |
| Figura 24 –Linhas de corrente e vorticidade relativa no nível de 600hPa para às 00:00 UTC do dia 04 de Novembro de 2013..... | 60 |
| Figura 25 – Imagem composta dos satélites GOES-13 + METEOSAT-10 no canal espectral infravermelho (IR) para às 00:00 dia 04 de Novembro de 2013. Círculo em azul simboliza a localização aproximada do vórtice ciclônico em 200hPa..... | 61 |
| Figura 26 – Água precipitável (mm) para às 00:00 UTC do dia 04 de Novembro de 2013..... | 62 |

| | |
|--|----|
| Figura 27 – Precipitação diária (24h) na área de estudo (Recife, Maceió e Aracaju) durante o período de vida do VCAN-3, de 03 à 05 de Novembro de 2013..... | 63 |
| Figura 28 - Imagem composta dos satélites GOES-13 + METEOSAT-09 no canal espectral infravermelho para às 12:00 UTC do dia 19 de Dezembro de 2013. Círculo em azul simboliza a localização aproximada do vórtice ciclônico em 200hPa..... | 64 |
| Figura 29: Linha de corrente e vorticidade relativa no nível de 200hPa para às 12:00 UTC do dia 19 de Dezembro de 2013..... | 65 |
| Figura 30 – Seção vertical longitudinal na latitude de 12,5°S do campo de velocidade vertical (omega) para às 12:00 UTC do dia 19 de Dezembro de 2013..... | 66 |
| Figura 31: Linha de corrente e vorticidade relativa no nível de 200hPa para às 12:00 UTC do dia 27 de Dezembro de 2013..... | 67 |
| Figura 32: Linha de corrente e vorticidade relativa no nível de 200hPa para às 18:00 UTC do dia 28 de Dezembro de 2013..... | 67 |
| Figura 33 – Precipitação diária ocorrida na área de estudo (Recife, Maceió e Aracaju) durante o período de vida do VCAN-4, de 12 à 28 de Dezembro de 2013..... | 68 |
| Figura 34 – Imagens de impactos causados pela precipitação extrema na cidade de Recife no dia 19 de Dezembro de 2013..... | 69 |
| Figura 35 – Imagem composta dos satélites GOES-13 + METEOSAT-10 no canal espectral infravermelho para às 18:00 UTC do dia 13 de Março de 2014. Círculo em azul simboliza a localização aproximada do vórtice ciclônico em 200hPa..... | 70 |
| Figura 36 – Linhas de corrente e vorticidade relativa no nível de 200hPa para às 18:00 UTC do dia 11 de Março de 2014..... | 71 |
| Figura 37 – Linhas de corrente e vorticidade relativa no nível de 200hPa para às 18:00 UTC do dia 12 de Março de 2014..... | 71 |
| Figura 38 – Linhas de corrente e vorticidade relativa no nível de 200hPa para às 18:00 UTC do dia 13 de Março de 2014..... | 72 |
| Figura 39 – Precipitação diária na área de estudo (Recife, Maceió e Aracaju) durante o período de vida do VCAN-5, de 11 à 13 de Março de 2014..... | 73 |

| | |
|--|----|
| Figura 40 – Linhas de correntes e vorticidade relativa no nível de 200hPa para às 06:00 UTC do dia 16 de Fevereiro de 2015..... | 74 |
| Figura 41 – Linhas de correntes e vorticidade relativa no nível de 200hPa para às 12:00 UTC do dia 18 de Fevereiro de 2015..... | 75 |
| Figura 42 – Linhas de correntes e vorticidade relativa no nível de 200hPa para às 12:00 UTC do dia 25 de Fevereiro de 2015..... | 75 |
| Figura 43 - Seção vertical longitudinal na latitude de 15° Sul do campo de velocidade vertical (omega) para às 12:00 UTC do dia 18 de Fevereiro de 2015..... | 76 |
| Figura 44 - Imagem composta dos satélite GOES-13 + METEOSAT-10 no canal espectral infravermelho para às 18:00 UTC do dia 18 de Fevereiro de 2015. Círculo em azul simboliza a localização aproximada do vórtice ciclônico em 200hPa..... | 77 |
| Figura 45 – Campo de água precipitável para as 00:00 UTC do dia 18 de Fevereiro de 2015..... | 77 |
| Figura 46 – Precipitação diária na área de estudo (Recife, Maceió e Aracaju) durante o período de vida do VCAN-6, de 16 à 25 de Fevereiro de 2015..... | 78 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Valores do Índice K com indicativo para o grau de formação de nuvens cumulunimbus (Cbs)..... | 33 |
| Tabela 2 – Valores de CAPE com o indicativo do estado da atmosfera no sentido vertical, ou potencial para o desenvolvimento de tempestades..... | 33 |
| Tabela 3 – Quantidade de dias sem precipitação, com precipitação e com precipitação extrema na cidade de Recife durante janeiro de 2011 à dezembro de 2015..... | 41 |
| Tabela 4 – Quantidade de dias sem precipitação, com precipitação e com precipitação extrema na cidade de Maceió durante janeiro de 2011 à dezembro de 2015..... | 42 |
| Tabela 5 – Quantidade de dias sem precipitação, com precipitação e com precipitação extrema na cidade de Aracaju durante janeiro de 2011 à dezembro de 2015..... | 43 |
| Tabela 6 – Período de vida dos VCANs: data de início, término e duração em dias..... | 44 |
| Tabela 7 – CAPE e Índice K às 12:00 UTC dos dias 13, 14, 19 e 20 de Fevereiro de 2011..... | 52 |
| Tabela 8 – Valores de CAPE e Índice K na estação de Recife para às 12:00 UTC dos dias 20, 21, 22 e 23 de Janeiro de 2012..... | 57 |
| Tabela 9 – Valores de CAPE e Índice K na estação de Recife para às 12:00 UTC dos dias 19 e 20 de Dezembro de 2013..... | 69 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AB – Alta da Bolívia

ASAS – Alta Subtropical do Atlântico Sul

AL – Alagoas

Cbs – Cumulonimbus

CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

EPE – Eventos de Precipitação Extrema

GOES - Geostationary Operational Environmental Satellites

HN – Hemisfério Norte

HS – Hemisfério Sul

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

METEOSAT - Meteorological Satellite

NCEP – National Centers for Environmental Prediction

NCAR – National Center for Atmospheric Research

NEB – Nordeste Brasileiro

PE – Pernambuco

SF – Sistema Frontal

TSM – Temperatura da Superfície do Mar

UTC – Tempo Universal Coordenado

VCAN – Vórtice Ciclônico de Altos Níveis

ZCAS – Zona de Convergência do Atlântico Sul

ZCIT – Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 16 |
| 2. OBJETIVOS | 19 |
| 2.1. Objetivo Geral | 19 |
| 2.2. Objetivos Específicos | 19 |
| 3. REVISÃO DE LITERATURA | 20 |
| 3.1 Características gerais do VCAN | 20 |
| 3.2 Mecanismos de formação do VCAN | 21 |
| 3.3. Principais sistemas associados à formação do VCAN | 22 |
| 3.3.1 Sistemas Frontais (SF) | 22 |
| 3.3.2 Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) | 24 |
| 3.3.3 Alta da Bolívia (AB) | 25 |
| 3.3.4 Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) | 26 |
| 3.4 Impactos urbanos decorrentes de precipitações extremas | 27 |
| 4. MATERIAIS E MÉTODOS | 29 |
| 4.1 Área de Estudo | 29 |
| 4.2 Período de estudo | 30 |
| 4.3 Dados utilizados | 30 |
| 4.3.1 Imagens de Satélites | 30 |
| 4.3.2 Dados diários de precipitação | 31 |
| 4.3.3 Reanálises do NCEP/NCAR | 31 |
| 4.3.4 Radiossondagens | 32 |
| 4.4 Utilização do Software GrADS | 34 |
| 4.5 Metodologia aplicada na identificação e seleção dos casos de VCANS | 35 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 37 |
| 5.1 Avaliação quantitativa da precipitação | 37 |

| | | |
|--------------|---|-----------|
| 5.2 | Os casos de VCANs | 44 |
| 5.3 | Análise da posição e deslocamento dos VCANs..... | 45 |
| 5.4 | Descrição dos casos..... | 48 |
| 5.4.1 | VCAN-1..... | 48 |
| 5.4.2 | VCAN-2..... | 53 |
| 5.4.3 | VCAN-3..... | 58 |
| 5.4.4 | VCAN-4..... | 64 |
| 5.4.5 | VCAN-5..... | 70 |
| 5.4.6 | VCAN-6..... | 73 |
| 6. | CONCLUSÕES | 79 |
| 7. | SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTUROS | 80 |
| | REFERÊNCIAS | 81 |

1. INTRODUÇÃO

Estudos relacionados à eventos de precipitação extrema, como o Teixeira e Satyamurti (2011), evidenciam que existe um aumentando na frequências desses eventos nos últimos anos. Esse é um tema que vem ganhando significativa atenção no meio científico e, é relativamente frequente ouvir nos noticiários os grandes prejuízos causados por tais fenômenos. Embora não seja possível impedir seu acontecimento, através de um estudo detalhado é possível obter informações no tempo e espaço de características da formação, intensidade, duração e severidade desse tipo de evento, permitindo que medidas preventivas sejam tomadas em curto e longo prazo, para minimizar impactos causados (SANTOS et al., 2011; BATISTA, 2013).

Kobiyama et al. (2006) e Changnon (1996) afirmam que casos de extremos de precipitação tem consequências em curto e longo prazo, através de impactos diretos à agricultura e pecuária, aos recursos hídricos, à infraestrutura urbana, como também aos seres humanos, afetando o bem-estar social. Quando esses extremos da natureza atingem áreas ocupadas ou utilizadas pelo homem, resultando em danos (humanos e materiais) e prejuízos socioeconômicos, estes são considerados desastres naturais.

No Brasil, as precipitações estão associadas a quase a totalidade dos desastres naturais, pois não são frequentes situações como maremotos, terremotos ou erupções vulcânicas, comuns em outras regiões do planeta.

O Nordeste do Brasileiro (NEB) é conhecida por possuir variações extremas no seu regime pluvial ao longo do ano, sendo muito seco no período do verão e muito chuvoso durante o inverno. O regime pluvial dessa região é influenciado por diversos sistemas meteorológicos de diferentes escalas, tais como Zona de Convergência Intertropical (Uvo, 1989), Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis (Kousky e Gan, 1981),

frentes frias (Kousky, 1979), linhas de instabilidade (Cohen et al., 1995) e Perturbações Ondulatórias dos Alísios (MOLION e BERNARDO, 2002).

O período entre o final dos anos 1950 e início dos anos 1970 foi marcado pelo desenvolvimento de diversos estudos sobre as características do Vórtice Ciclônico em Altos Níveis (VCAN) nos subtropicais do Hemisfério Norte (HN). As primeiras discussões a respeito da origem e formação desses sistemas no HN foram feitas por Palmén (1949), Palmer (1951), Simpson (1951), Ricks (1959) e Frank (1970). Na América do Sul, a existência do VCAN foi demonstrada através de estudos das características da circulação troposférica. Os primeiros estudos realizados sobre os VCAN no Atlântico sul tropical foram feitos por Dean (1971), Aragão (1975) e Virji (1981) nos quais observaram a formação desses sistemas na região do Atlântico Sul Tropical.

A ocorrência desse sistema acontece tanto nas regiões tropicais como nas subtropicais, sendo que o VCAN subtropical formam-se nas regiões Sul e Sudeste do Brasil associado a padrões em altos níveis que chegam pela costa oeste da América do Sul vindos do Pacífico (LOURENÇO et al., 1996), sendo classificado como VCAN do tipo Palmén, podendo se formar em qualquer época do ano. Já o VCAN tropical origina-se sobre o Oceano Atlântico entre as Longitudes 20°W e -45°W e Latitudes 0° e -28°S, sendo classificado como VCAN do tipo Palmer e é esse tipo de VCAN que influencia as condições de tempo no Nordeste do Brasil no período do verão (Kousky e Gan, 1981; Alves et., al, 1996).

Tendo em vista os enormes transtornos e prejuízos, tanto humano quanto material, causados pelas condições de tempo associadas ao VCAN, vários pesquisadores vêm se dedicando ao estudo deste sistema. Kousky e Gan (1981) mostraram que a formação do VCAN ocorre devido à intensificação da Alta da Bolívia associada à penetração de

sistemas frontais vindos das altas latitudes. Figueroa (1997) atribuiu como principal fator para a formação do VCAN uma fonte de calor em baixos níveis próxima à costa dos estados do Espírito Santo e Bahia. Ramirez (1999) percebeu que os VCANs que possui deslocamento zonal são mais intensos do que aqueles que possuem deslocamento meridional. Paixão e Gandu (2000) identificam quatro diferentes mecanismos de formação do VCAN.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Estudar casos de Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis (VCAN) que provocaram eventos de precipitações extremas nas cidades de Recife, Maceió e Aracaju durante o período de 2011 à 2015.

2.2. Objetivos Específicos

AVALIAR quantitativamente a precipitação nas cidades de Recife, Maceió e Aracaju, caracterizando a precipitação média mensal e a variabilidade de eventos de precipitações extremas, identificando tendências ou mudanças na sua distribuição;

ANALISAR campos compostos de variáveis meteorológicas (linhas de corrente, velocidade vertical, vorticidade relativa e água precipitável) em toda a troposfera na região do centro e da periferia do VCAN;

IDENTIFICAR os mecanismos de formação e o tipo de deslocamento dos casos de VCANS;

RELATAR impactos sociais urbanos (alagamentos e escorregamentos de terra, bem como, perdas de vidas humanas) decorrentes dos eventos de precipitação extrema associados aos caos de VCANS;

CONTRIBUIR com a ciência meteorológica buscando um melhor entendimento sobre as características sinóticas do VCAN que atuam sobre o NEB.

3. REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo aborda os aspectos do VCAN de origem tropical, tais como, a configuração da nebulosidade e circulação, tempo de vida, estrutura vertical, deslocamento e os principais mecanismos e sistemas associados à sua formação. Aborda também os principais impactos no meio urbano associado à precipitações extremas.

3.1 Características gerais do VCAN

Também conhecidos por baixa fria em altos níveis, o VCAN é um sistema de escala sinótica que tem como característica principal uma circulação ciclônica fechada com núcleo frio em altos níveis da troposfera e estão geralmente associados a eventos de chuvas intensas. Conforme demonstrado por Kousky e Gan (1981), são um conjunto de nuvens que observado pelas imagens de satélite, tem a forma aproximada de “S”. Na periferia do VCAN há formação de nuvens causadoras de chuva e no centro há movimentos de subsidência de ar, aumentando a pressão e inibindo a formação de nuvens. Podem ser totalmente secos ou acompanhados de muita nebulosidade, dependendo da sua profundidade. Assim, os que estão confinados na alta troposfera acima de 400 hPa possuem pouca ou nenhuma nebulosidade, enquanto os que atingem níveis mais baixos, possuem nebulosidade muita intensa (GAN, 1982).

A intensificação do VCAN ocorre devido à convecção de energia potencial em energia cinética através da liberação de calor latente ao longo da periferia do sistema (GAN, 1982). A desintensificação ocorre através da destruição da energia cinética. Esse processo geralmente ocorre sobre os continentes e deve-se ao aquecimento (calor sensível) da superfície e ao calor latente liberado pelas nuvens do tipo cumulonimbus situadas na sua periferia (KOUSKY e GAN, 1981).

Quanto ao deslocamento, os VCANs são observados com movimentos em ambas as direções e podem ficar estacionários por um período de três a quatro dias. De acordo com Ramirez et al., (1999), os que possuem deslocamento predominante de leste para oeste são os mais intensos e existem alguns casos relativamente raros em que se deslocam até o centro do continente, podendo alcançar a parte oeste do continente sul americano.

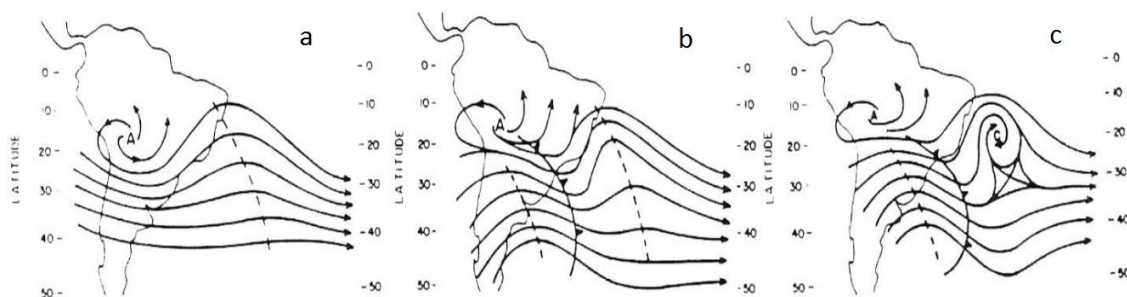
O tempo médio de vida de um VCAN varia de quatro a onze dias, sendo os mais duradouros surgindo com maior frequência no mês de Janeiro e os de menor permanência surgindo no mês de Novembro (RAMÍREZ et al., 1999; SILVA e LIMA, 2001). Paixão e Gandu (2000) e Ramírez et al. (1999) observaram que o número de ocorrências e o tempo de duração estão relacionados ao mecanismo de formação.

3.2 Mecanismos de formação do VCAN

Na literatura, diversos estudos foram desenvolvidos visando compreender os mecanismos que originam os VCANs. Atualmente existem quatro principais modelos conceituais para a gênese dos VCANs: a Formação Clássica, proposta por Kousky e Gan (1981), a Formação Alta, proposta por Ramirez et al. (1999) e a Formação Africana I e II, propostos por Paixão e Gandu (2000).

A Formação Clássica (Figura 1) do VCAN está associada a um sistema de alta pressão que surgem em altos Níveis na região Bolívia, conhecida como a Alta da Bolívia e a um cavado sobre o Oceano Atlântico Sul à vanguarda das frentes que penetram nessa região. A formação do VCAN estaria relacionada com a propagação de energia de onda no sentido sudeste-nordeste.

Figura 1 - Sequência esquemática do primeiro modelo conceitual para a formação de Vórtices Ciclônicos em 200 hPa no Atlântico Sul.



Fonte: Kousky e Gan, 1981.

A Formação Alta deve-se a um sistema de circulação anticiclônica sobre o Oceano Atlântico Tropical Sul, conhecida como a Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) associada à Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). A origem do vórtice é resultado da formação de um cavado a norte/noroeste da ASAS.

Pela Formação Africana I, o VCAN se forma devido à intensificação da convecção na África, que faz surgir um par de anticlones em altos níveis. Esses anticlones aparentemente induzem um aprofundamento do cavado a oeste dos mesmos, onde o VCAN é formado a sudoeste da bifurcação inter-hemisférica. Já na Formação Africana II, a formação do VCAN é devido ao deslocamento em altos níveis de um cavado vindo da região sudoeste do Saara.

3.3. Principais sistemas associados à formação do VCAN

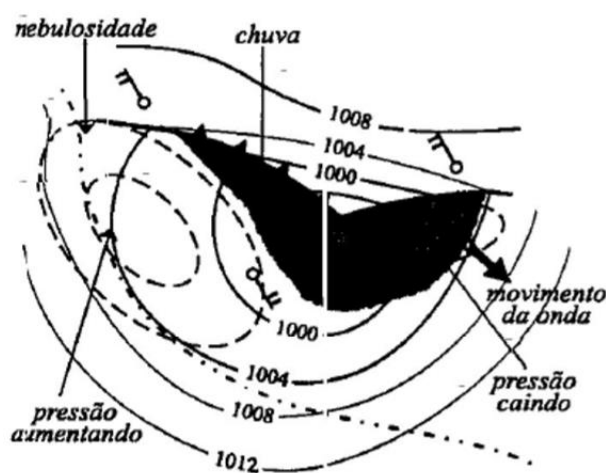
3.3.1 Sistemas Frontais (SF)

O conceito de frente surgiu depois da I Guerra Mundial e foi introduzido por Bjerknes (1919), que fez uma analogia entre as diferentes massas de ar e exércitos adversários que se confrontavam em um campo de batalha. Ele definiu como frente a zona de transição entre duas massas de ar com características físicas distintas e fortes gradientes de temperatura e umidade, o que é atualmente chamada de zona frontal. Mais

tarde, alguns autores como Pettersen (1956); Vianello (1991) e Oliveira et al., (2001) preferiram definir frente como sendo a intersecção da superfície frontal com o nível da superfície e é esta intersecção que é representada nas cartas sinóticas.

Um sistema frontal clássico é composto por uma frente fria, uma frente quente e um centro de baixa pressão em superfície, denominado ciclone (Figura 2).

Figura 2 – Esquema de um sistema frontal desenvolvido. Linhas inteiras: Isóbaras.



Fonte: Oliveira et al. (2001, p. 273).

As frentes ou sistemas frontais é um dos principais sistemas sinóticos atuantes na América do Sul, podem acontecer em qualquer época do ano e penetrar até latitudes tropicais, chegando até o NEB (LEMOS e CALBETE, 1996; QUADRO, 1994).

De acordo com o modelo clássico da Escola Norueguesa, as frentes podem ser classificadas como frente fria, quente, estacionária e oclusa.

Durante a formação de um sistema frontal o ar frio em confluência com o ar quente o desloca na superfície originando sua ascensão, o que faz formar nuvens com desenvolvimento vertical e conseqüentemente ocasiona precipitação adiante da frente. Antes da chegada de uma frente fria em um determinado local é notada uma redução na pressão atmosférica, aumento da temperatura do ar e intensificação dos ventos. Após a

passagem da frente, a pressão sobe rapidamente, a temperatura cai e o vento muda de direção (normalmente de sudoeste para noroeste no Hemisfério Norte, e de norte ou nordeste para de sul ou de sudoeste no Hemisfério Sul) (VIANELLO, 1991; FEDOROVA, 1999; OLIVEIRA et al., 2001).

Oliveira (1986) realizou um estudo sobre frentes que atuaram no Brasil no período de 1975 a 1984. Foi visto que algumas frentes frias atingem o Nordeste e deslocam-se para o Oceano Atlântico, onde posteriormente ocorre uma frontólise. As frentes que chegam ao Nordeste são menos frequentes que nas regiões Sudeste e Sul do Brasil e na maior parte das vezes estão associadas com a convecção tropical na Amazônia.

Durante o verão, estes sistemas podem ficar estacionários sobre o litoral da Região Sudeste, dando origem a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), que tem um papel importante sobre a pluviometria do Brasil nos meses da primavera e verão, podendo influenciar o regime de chuvas no sul do estado da Bahia (NOBRE et al, 2002).

3.3.2 Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS)

É caracterizada por uma faixa de nebulosidade convectiva com orientação noroeste-sudeste, que se estende desde a região amazônica até o Sudeste do Brasil e, frequentemente, sobre o oceano Atlântico subtropical, associada a um escoamento convergente na baixa troposfera (CARVALHO e JONES, 2002).

Kodoma (1993) caracterizou a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) como uma forte convergência de umidade, frontogênese nos campos de temperatura potencial equivalente e a geração de instabilidade convectiva, associadas a um jato subtropical em altos níveis da troposfera. Segundo Rivero (1991), os Andes possuem um importante papel para a formação da ZCAS, favorecendo a formação da faixa de

nebulosidade convectiva, em conjunto com a convecção sobre a Amazônia e o Brasil Central.

Os mecanismos de formação, intensificação, manutenção e dissipação da ZCAS ainda são pouco conhecidos. Diversos autores tentaram explicar a formação das ZCAS. Barros et al., e Teixeira (2002) mostraram que a configuração da TSM é importante para o seu posicionamento e intensidade, embora não seja fundamental para a sua formação.

Quadro (1994) realizou um estudo de episódios de ZCAS para a Região Sudeste, analisando 10 anos (1980 a 1989) de dados. Verificou que existe uma convergência de umidade em baixos e médios níveis na região de estabelecimento das ZCAS. Em níveis médios, existe um cavado sobre a costa leste da América do Sul e uma faixa de movimento vertical ascendente, ambos orientados na direção da ZCAS.

3.3.3 Alta da Bolívia (AB)

A Alta da Bolívia (AB) é uma circulação anticiclônica (alta pressão atmosférica com o ar girando no sentido anti-horário no Hemisfério Sul) de grande escala que ocorre na troposfera superior, centrada no platô boliviano. Este sistema meteorológico está associado a intensa liberação de calor latente de condensação que ocorre naquela região, constituindo-se numa fonte de calor em grande escala. No período de verão, a Alta da Bolívia contribui para as chuvas que ocorrem principalmente nas regiões Norte e Centro-Oeste do Brasil. A Alta da Bolívia, em alguns casos, pode influenciar a formação dos VCANs, intensificando-os sobre o NEB e contribuindo com o aumento nos volumes de chuvas sobre essa região (VIRJI, 1981; CARVALHO, 1989; GANDU e SILVA DIAS, 1994, GAN, 2009).

A Alta da Bolívia atinge sua intensidade máxima durante o verão, enfraquecendo nos meses de outono. Esse anticiclone aparece em outubro sobre o oeste da Amazônia,

posiciona-se sobre a Bolívia no verão e em abril desloca-se para a Amazônia Central (CARVALHO, 1989; GANDU e SILVA DIAS, 1994).

A existência da AB é conhecida desde as décadas de 1960 e 1970 (GUTMAN e SCHWERDTFEGER, 1965; SCHWERDTFEGER, 1976; JONES e HOREL, 1990), porém, somente após o estudo com dados de vento obtidos das imagens de satélite por Virji (1981), verificou-se claramente a presença desta alta sobre o altiplano boliviano na alta troposfera.

A Alta da Bolívia possui um período de permanência da ordem de 34 - 40 dias e um outro secundário de 12 dias. Durante o período de máxima intensidade da AB, o continente é dominado por muita nebulosidade e conseqüentemente pouca radiação solar atinge a superfície do continente, fazendo com que diminua a convecção. À medida que a AB enfraquece, diminui a nebulosidade, aumenta a radiação solar e, por conseguinte o continente volta a ser aquecido (GANDU e SILVA DIAS, 1994).

3.3.4 Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS)

As Altas Subtropicais são sistemas de alta pressão localizados em latitudes médias nos principais oceanos do planeta Terra. Sua formação é devido à circulação de grande escala associada a célula de Hadley. Se caracterizam por serem semipermanente e praticamente circundarem o globo, principalmente sobre o Hemisfério Norte por causa da distribuição de continente e oceanos (mais continente que oceano). A teoria dinâmica de Rossby explica que a invasão do ar polar em direção às regiões subtropicais provoca a formação de séries de ciclones e anticiclones, que ali se desenvolvem e sequencialmente, alimentam os anticiclones subtropicais (FEDOVA, 1999).

A estrutura vertical da circulação atmosférica associada a ASAS favorece o transporte de umidade do oceano para o continente na baixa troposfera, tanto ao longo da

ZCAS quanto ao longo da costa do Nordeste. Machel et al. (1998) analisaram o comportamento dos centros de pressão sobre o Oceano Atlântico Sul e observaram que a ASAS apresenta uma variação sazonal, caracterizada por uma dupla oscilação longitudinal.

3.4 Impactos urbanos decorrentes de precipitações extremas

Quando ocorre eventos de precipitações extremas, uns dos principais impactos causado no meio urbano são os alagamentos, que é ocasionado pelo acúmulo momentâneo de água na superfície urbana e na maioria das vezes ocorrem por falhas no sistema de drenagem. Também existem as inundações, que ocorrem quando a água de um rio ou córrego transborda para as planícies marginais localizados em área urbana (CAMPOS, 1984; GUIMARÃES, 2000; TUCCI, 2001; SCARLATO, 1999).

O solo das cidades possui parcela considerável de sua superfície impermeabilizada pelas edificações, pavimentação de vias e calçadas. A transformação de áreas anteriormente permeáveis em áreas impermeáveis induz a um desequilíbrio hidrológico, caracterizado pelo aumento do escoamento superficial e pela antecipação dos picos de vazão no tempo, o que está diretamente relacionado com as inundações e alagamentos. (SCARLATO, 1999; TUCCI, 2006).

Outro tipo de impacto no meio urbano influenciado pela precipitação são os escorregamentos de terra, que são movimentos rápidos de porções de terrenos (solos e rochas) que se deslocam por ação da gravidade, para baixo e para fora da encosta. O termo escorregamento tem diversos sinônimos de uso, e é mais generalizado na linguagem popular como deslizamento de barreira, desbarrancamento e desmoronamento (AMARAL e GUTJAHR, 2011).

Com a crescente urbanização e a desordenada ocupação humana em áreas impróprias à moradia, os escorregamentos de terra vêm fazendo um grande número de vítimas fatais, sendo considerado como uma catástrofe somente inferior aos terremotos e inundações entre os fenômenos naturais que mais afetam a humanidade (CAMPOS, 1984, FERNANDES e AMARAL, 1996; GUIMARÃES, 2000; REDIVO et al, 2003).

A dificuldade do acesso a moradia nas grandes cidades, associada a baixa atuação do poder público leva a ocupação indiscriminada de zonas impróprias, tais como áreas de várzeas, terrenos com elevadas declividades e áreas com alta suscetibilidade aos processos erosivos, potencializando a ocorrência de desastres naturais, ou seja, os impactos ambientais atingem muito mais os espaços físicos de ocupação das classes sociais menos favorecidas. (GUERRA e CUNHA, 2004; SANTOS, 2007).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Área de Estudo

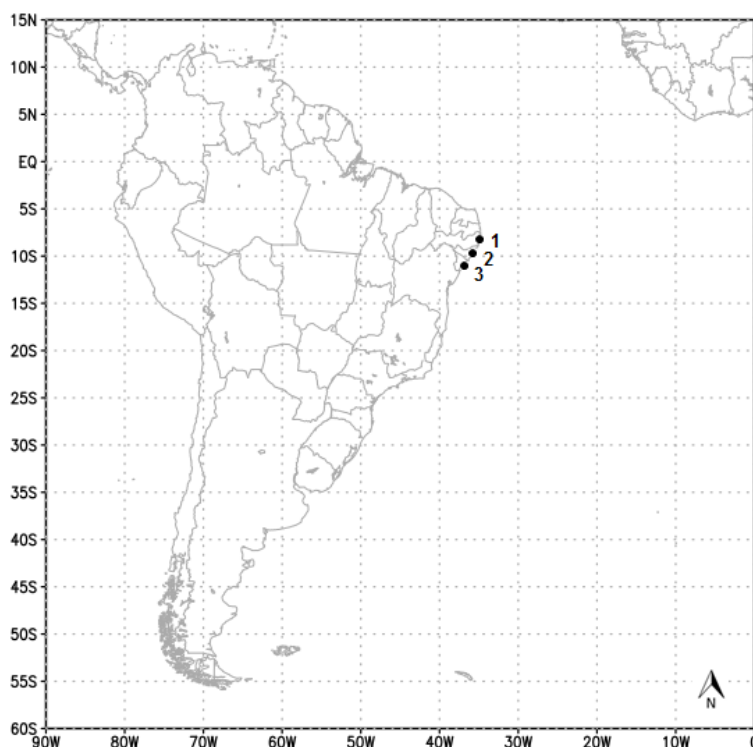
A área de estudo compreende toda a América do Sul, visto que, o VCAN é um sistema de escala sinótica, abrangendo uma grande área, desde seu surgimento até a dissipação. Mas, existem três pontos de referência, que são as cidade de Recife, Maceió e Aracaju (Figura 3), ambas estão localizadas no extremo leste da América do Sul, mesorregião da Zona da Mata nordestina.

Recife (1): é a capital do estado de Pernambuco, possui uma população estimada em 1 617 183 habitantes e área territorial de 218 km², é formada por uma planície aluvial, constituída por ilhas e manguezais. Possui a quarta concentração urbana mais populosa do Brasil (IBGE, 2015). Apresenta clima quente e úmido, que segundo a classificação climática de Köppen corresponde ao tipo As', caracterizando por apresentar-se sem grandes diferenciações térmicas e precipitação concentrada no outono e inverno.

Maceió (2): capital do estado de Alagoas, encontra-se na latitude 9°39'57" Sul e longitude 35°44'07" Oeste. Apresenta clima quente e úmido (As'). Abrange uma área territorial de 510,655km² e tem população estimada em 1 115 150 habitantes (Censo IBGE, 2015).

Aracaju (3): é a capital do estado de Sergipe, está inserida na mesorregião do Leste Sergipano entre as coordenadas geográficas de 10° 55' 56" de latitude sul e 37° 04' 23" de longitude oeste. É banhada a leste pelo Oceano Atlântico e cortada por rios, como o Sergipe e o Poxim. Abrange uma área territorial de 181,857 km² e população estimada em 632 744 habitantes (IBGE, 2015).

Figura 3 –Mapa da localização dos pontos de referência (1, 2 e 3) na América do Sul.



Fonte: Autor, 2016.

4.2 Período de estudo

Para a identificação e análise sinótica dos casos de VCANs, foi escolhido o período compreendido desde Janeiro de 2011 até Dezembro de 2015. Também se utilizou dados de precipitação diária desde 1986 até 2015, para caracterização climática da precipitação média mensal e da variabilidade mensal do número de eventos de precipitação da extrema.

4.3 Dados utilizados

4.3.1 Imagens de Satélites

Foram utilizadas imagens composta dos satélites GOES + METEOSAT com abrangência para a América do Sul. Todas as imagens foram obtidas a partir do Centro de previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

4.3.2 Dados diários de precipitação

Todos os dados foram obtidos do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), que disponibiliza gratuitamente dados meteorológicos desde 1961. Os dados de precipitação diária são provenientes das estações de Recife (OMM: 82900), Maceió (OMM: 82994) e Aracaju (OMM: 83096).

4.3.3 Reanálises do NCEP/NCAR

Foram utilizados um conjunto de dados de reanálises do projeto do NCEP (National Centers for Environmental Prediction) e do NCAR (National Center for Atmospheric Research), que disponibilizam séries históricas desde 1948 até a atualidade, com resolução espacial de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ e resolução temporal de até 6h. As reanálises envolve a recuperação de dados de superfície terrestre, navio, radiossonda, aviões, satélites e outros dados, controle e assimilação. Para a geração desses dados são usados campos globais atmosféricos e de fluxos superficiais derivados dos sistemas de previsão numérica e de assimilação de dados do NCEP/NCAR (KALNAY et al., 1996; KISTLER et al., 2001).

Os campos gerados provenientes dos dados de reanálise foram para as seguintes variáveis meteorológicas:

Linhas de Corrente: representam uma situação instantânea do campo de velocidade do vento em determinada trajetória de parcelas individuais do fluido durante um intervalo de tempo. Pode ser representada pela Equação 1 (HOLTON, 1997).

$$\frac{dy}{dx} = \frac{v(x,y,t_0)}{u(x,y,t_0)} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde “u” e “v” são componentes do vento nas direções “x” e “y”.

Água Precipitável (mm): representa o conteúdo de vapor de água atmosférico contido em uma coluna vertical da atmosfera de área unitária e altura da superfície ao topo da atmosfera. Representada pela Equação 2 (CAVALCANTE, 2001).

$$P_w \approx \frac{1}{\rho_w g} \int w(p) dp \quad \text{Eq. 2}$$

Onde “ ρ_w ” é a densidade da água no estado líquido, “ w ” é a proporção de mistura do meio ambiente ao nível da pressão “ p ”. “ g ” é a aceleração da gravidade.

Vorticidade Relativa (s^{-1}): trata-se de um campo vetorial, associado ao cisalhamento do vento tridimensional, ou seja, Tendência do cisalhamento do vento num dado ponto, ou, é a medida microscópica da rotação de um fluido. O valor mínimo de referência para que ocorra circulação fechada é de $-6 \times 10^{-5} s^{-1}$. É dada pela Equação 3 (HOLTON, 1997).

$$\vec{\zeta} = \frac{dv}{dx} - \frac{du}{dy} \quad \text{Eq. 3}$$

$\zeta > 0 \rightarrow$ associada a ciclone no Hemisfério Norte; anticiclone no Hemisfério Sul.

$\zeta < 0 \rightarrow$ associada a ciclone no Hemisfério Sul; anticiclone no Hemisfério Norte.

Omega ($hPa \cdot s^{-1}$): representa a velocidade dos movimentos verticais. A componente vertical do vento é usualmente 1000 vezes menor que a componente horizontal. A velocidade vertical do vento é negativa para movimento ascendente do ar e positiva para movimento descendente.

4.3.4 Radiosondagens

A radiossonda é um conjunto de instrumentos e sensores para medir a temperatura do ar, umidade relativa e pressão atmosférica, enquanto é elevada na atmosfera até alturas da ordem de 16 Km, por um balão inflado com gás hélio. O deslocamento da sonda é

registrado por uma antena GPS que permite a medida da direção e velocidade do vento. Os dados observados são enviados via rádio para a estação receptora no solo que os processa. Utilizou-se dados provenientes de radiossondagens da estação situada na cidade de Recife, obtidos do banco de dados do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Especiais (INPE). Os Dados já são plotados em diagramas SKew T – Log P.

As principais variáveis analisadas provenientes das radiossondagens foram as seguintes:

Índice K - O índice K considera a estabilidade estática da camada de 850-500-hPa, dado pela Equação 4 (GEORGE, 1960). Na Tabela 1 pode ser visto o indicativo para formação de nuvens de tempestades.

$$K = (T_{850} - T_{500}) + T_{D850} - (T_{700} - T_{D700}) \quad \text{Eq. 4}$$

Onde: T_{850} é a temperatura de bulbo seco (°C) no nível de 850 hPa; T_{500} é a temperatura (°C) no nível de 500 hPa; T_{D850} é a temperatura de ponto de orvalho (°C) no nível de 850 hPa; T_{700} é temperatura (°C) no nível de 700 hPa e T_{D700} é temperatura de ponto de orvalho (°C) no nível de 700 hPa.

Tabela 1 - Valores do Índice K com indicativo para o grau de formação de nuvens cumulunimbus (Cbs).

| Valores do Índice K (°C) | Interpretação |
|---------------------------------|--------------------------------|
| 20 – 25 | Formação de Cbs isoladas |
| 25 – 30 | Formação de Cbs muito esparsas |
| 30 – 35 | Formação de Cbs esparsas |
| >35 | Formação de Cbs numerosos |

Fonte: twister.sbs.ohio-state.edu

CAPE – É um Índice utilizado para medida da instabilidade atmosférica, dado pela Equação 5 (MILLER, 1976). Na Tabela 2 é visto o indicativo do grau de instabilidade atmosférica.

$$\text{CAPE} = \int_{z = \text{NCE}}^{z = \text{NE}} g \frac{\Delta\theta_e}{\theta_{es}} dz \quad \text{Eq. 5}$$

Onde: NE é o nível de equilíbrio térmico (m); NCE é o nível de condensação espontânea (m); “g” é a aceleração da gravidade (m/s²); $\Delta\theta_e$ é a diferença entre a temperatura potencial equivalente da parcela em superfície e a temperatura potencial equivalente saturada do ambiente, em cada nível; θ_{es} é temperatura potencial equivalente saturada do ambiente, dada pela radiossondagem.

Tabela 2 – Valores de CAPE com o indicativo do estado da atmosfera no sentido vertical, ou potencial para o desenvolvimento de tempestades.

| Valores de CAPE (J/Kg) | Interpretação |
|------------------------|------------------------|
| 0 | Estável |
| 0 - 1000 | Pouco instável |
| 1000 - 2500 | Moderadamente instável |
| 2500 - 3500 | Muito instável |
| >3500 | Extremamente instável |

Fonte: twister.sbs.ohio-state.edu

4.4 Utilização do Software GrADS

O GrADS (Grid Analysis and Display System), é uma ferramenta utilizada para visualização e análise de dados em pontos de grade. Trabalha com matrizes de dados nos formatos BINÁRIO, GRIB, NetCDF ou HDF-SDS, nas quais as variáveis podem possuir até 4 dimensões (longitude, latitude, níveis verticais e tempo). Atualmente, o GrADS é um dos softwares mais utilizado nos centros operacionais e de pesquisa meteorológica espalhados pelo mundo, inclusive no Brasil. Este software foi originalmente desenvolvido pelo pesquisador Brian Doty (doty@cola.iges.org) no COLA (grads.iges.org/cola.html)

dentro da Universidade de Maryland no final da década de 80. Sua distribuição é totalmente livre e gratuita através de sua página oficial: <http://grads.iges.org/grads/index.html>.

4.5 Metodologia aplicada na identificação e seleção dos casos de VCANs

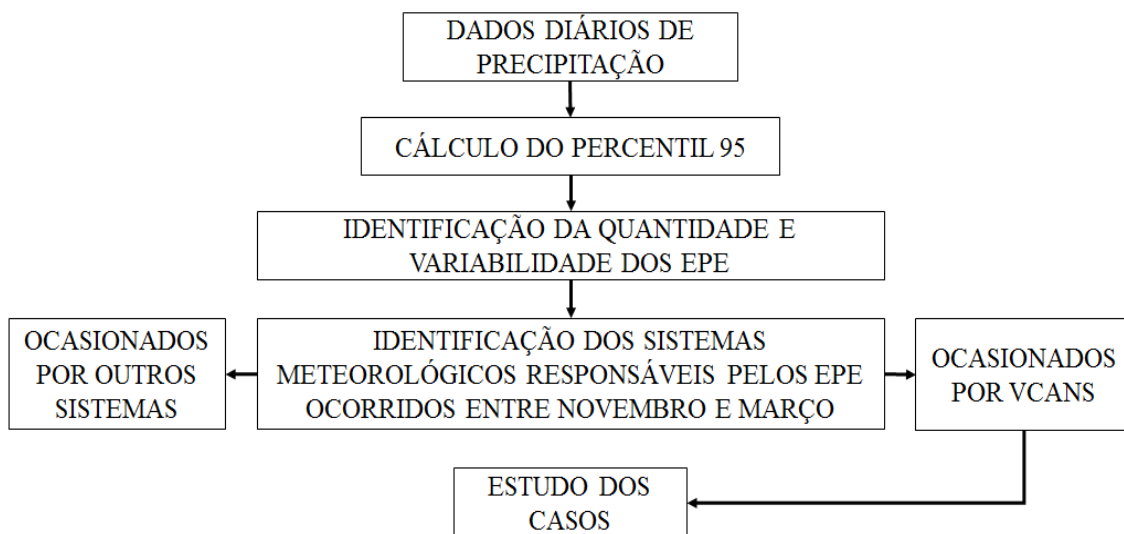
Primeiramente, com os dados de precipitação diária das estações do INMET localizadas nas cidades que constituem a área de estudo, foi utilizado a técnica dos percentis (Equação 6), proposta por Pinkayan (1966) e amplamente utilizada por Xavier (2001) e Santos 2013. Considerou-se como um evento de precipitação extrema (EPE) o valor igual ou superior ao percentil 95 (P_{95}) para o acumulado da precipitação diária.

$$P_i = li + \left(\frac{\frac{i * N}{100} - \sum f_i}{f_{pi}} \right) * h \quad \text{Eq. 6}$$

Com o valor obtido, pôde-se identificar a quantidade e variabilidade dos EPE ocorridos entre Janeiro de 2011 e Dezembro de 2015 na área de estudo. Selecionou-se os eventos ocorridos de Novembro a Março, que é considerado como o período da temporada de VCANs no NEB (maior frequência de VCANs), segundo Kousky e Gan (1981), Ramirez (1999) e Paixão e Gandu (2000).

A etapa seguinte foi identificar quantos dos EPE ocorridos entre Novembro e Março foram provocados por VCANs. Essa etapa foi realizada através das análises de imagens de satélites juntamente com os campos de linhas de corrente em altos níveis (200hPa). Foi considerado como início do VCAN quando se observou o surgimento de uma circulação ciclônica fechada (no sentido horário) e a dissipação do VCAN foi considerada quando se observou a desconfiguração do vórtice. O esquema das etapas é mostrado na Figura 4.

Figura 4 – Esquematização das etapas para identificação e seleção dos casos de VCANs para estudo.



Fonte: Autor 2016.

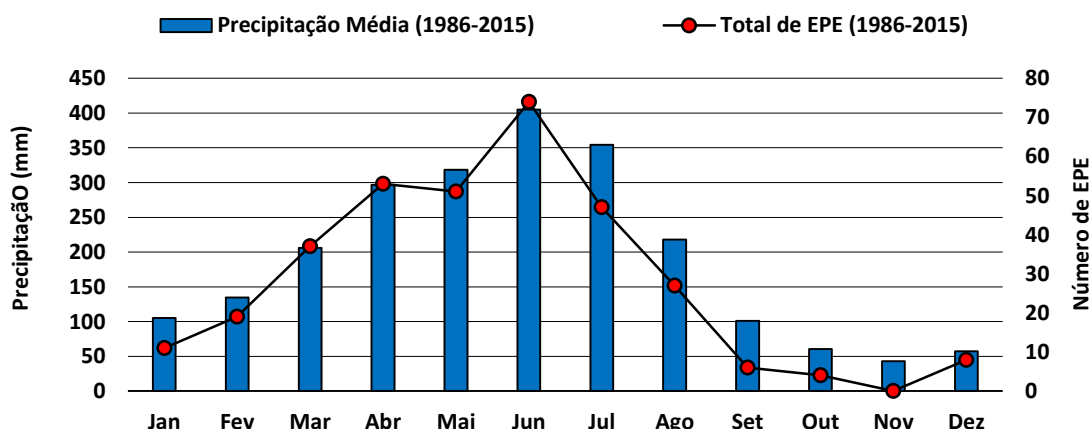
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Avaliação quantitativa da precipitação

O valor estabelecido para a ocorrência de um evento de precipitação extrema (EPE), obtido com o percentil 95 (P_{95}), mostrou uma variabilidade na área de estudo. Na cidade de Recife o valor observado do P_{95} foi igual a 42,2mm, em Maceió foi igual a 37,5mm e em Aracaju observou-se o valor de 30,4mm. Essa variabilidade é explicada devido as características pluviais diferentes de cada cidade. Assim, existirá a ocorrência de um EPE quando se obtiver o valor diário igual ou superior a 42,2mm, 37,5mm e 30,4mm, respectivamente para as cidade de Recife, Maceió e Aracaju.

A Figura 5 representa a variabilidade da precipitação média mensal e o número total EPE em cada mês, durante 1986 à 2015, para a cidade de Recife. Nota-se que o número de EPE é mais frequente na quadra chuvosa, que vai de Abril a Julho. O maior número de EPE ocorreu no mês de Junho, total de 74 EPE, que também foi o mês mais chuvoso de Recife.

Figura 5 – Precipitação média mensal e número total de eventos de precipitação extrema (EPE) em cada mês, durante 1986 à 2015, para a cidade de Recife.

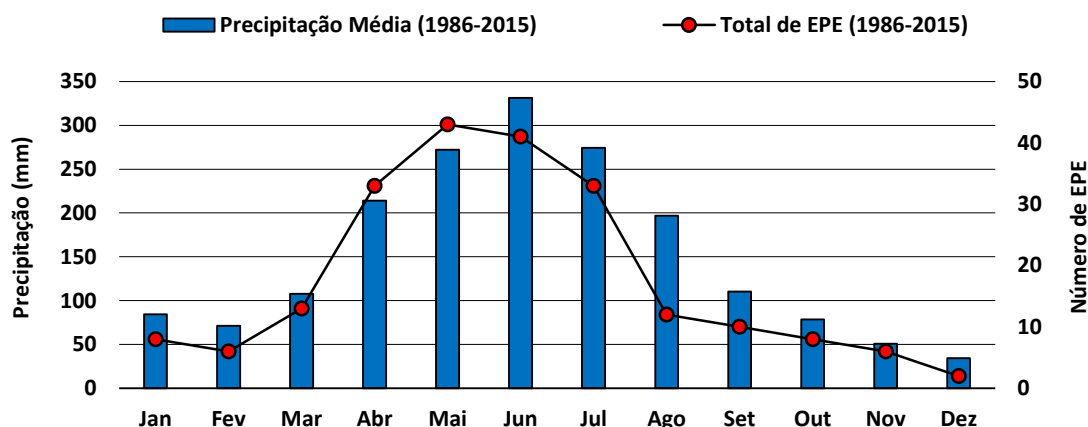


Fonte: Autor, 2016.

Na Figura 6 pode ser observado o comportamento da precipitação média mensal e o número total de EPE registrado em cada mês do ano na cidade de Maceió no período de 1986 à 2015. Durante o período de análise identificou-se 215 EPE, sendo que a maior frequência ocorreu nos meses de Abril à Julho (quadra chuvosa), respectivamente com 33, 43, 41 e 33 eventos cada.

Pela Normal Climatológica do INMET (Período 1961-1990) é observado que a quadra chuvosa também é de Abril a Junho, no entanto, o mês mais chuvoso observado no período 1961-1990 foi Maio, com 340,7mm, já no período 1986-2015, foi Junho, com 331,2mm.

Figura 6 – Precipitação média mensal e número total de eventos de precipitação extrema (EPE) para cada mês, durante 1986 à 2015 para a cidade de Maceió.

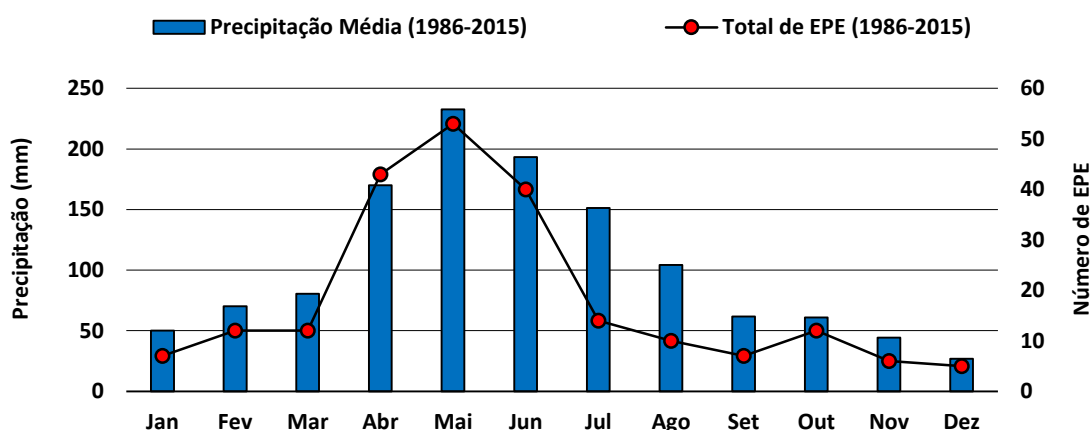


Fonte: Autor, 2016.

A representação da precipitação média mensal e do número de EPE durante 1986 a 2015 na cidade de Aracaju pode ser visualizado na Figura 7. Nota-se que, assim como já observado nas cidades de Recife e Maceió, a quadra chuvosa de Aracaju também é durante os meses de Abril à Julho, sendo o mês de Maio o mais chuvoso em Aracaju.

Nos meses de Abril, Maio e Junho concentraram-se 61,5% (136 de um total de 221) de todos os EPE registrados em Aracaju durante 1986 a 2015. Nota-se que no período Novembro-Março ocorrem relativamente baixa frequência de EPE. Esse fato também foi observado em Recife e Maceió, indicando que em épocas chuvosas há uma maior probabilidade de ocorrência de EPE.

Figura 7 - Precipitação média mensal e número total de eventos de precipitação extrema (EPE) para cada mês, durante 1986 à 2015 para a cidade de Aracaju.



Fonte: Autor, 2016.

As Tabelas 3, 4 e 5, mostradas a seguir, foram criadas neste trabalho para simplificar a visualização e o entendimento dos resultados. Através de uma análise simples é possível identificar períodos secos e chuvosos, assim como, a quantidade e a variabilidade dos EPE ocorridos na área de estudo durante 2011 à 2015.

A Tabela 3 está representando a quantidade de dias sem precipitação, com precipitação e com precipitação extrema na cidade de Recife durante janeiro de 2011 à dezembro de 2015. É possível observar que o ano que teve maior frequência de EPE foi 2011, com 21 eventos e o que apresentou a menor frequência foi o ano 2012, com apenas 6 eventos. Observou-se precipitação em 48,9% dos dias, sendo que 43,9% dessa precipitação foi inferior a 5mm.

Foi identificado em Recife um total de 56 EPE, sendo que durante a temporada de VCANs, de Novembro a Março, ocorreram 15 EPE, 26,8% do total. Constatou-se que o maior período sem precipitação aconteceu em 2015, entre 19 de Novembro a 14 de Dezembro, totalizando 26 dias. O maior número de dias consecutivos com EPE aconteceu em Maio de 2011 e em Junho de 2013, ambos com três eventos sequenciais.

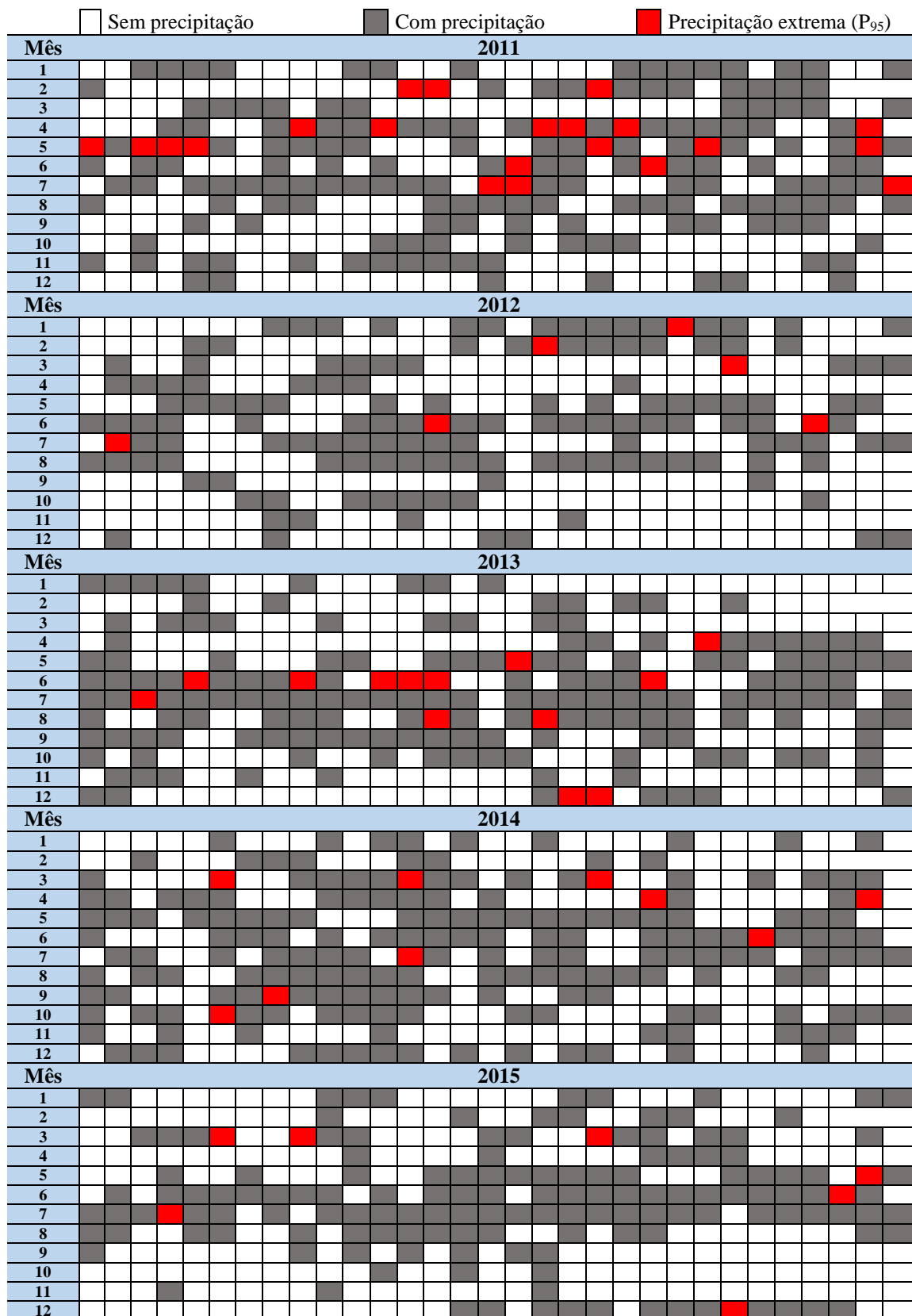
Na Tabela 4 é possível observar que durante Janeiro de 2011 a Dezembro de 2015 ocorreu 46 EPE na cidade de Maceió, com o ano de 2011 apresentando o maior número de eventos, 16. De Novembro a Março foi registrado 5 EPE, desses, 3 foram provocados pela ocorrência de VCAN. Em relação aos dias totais precipitados, registrou-se 751 dias com precipitação, 41% dos totais de dias do período.

As características pluviais diárias na a cidade de Aracaju durante 2011 à 2015 pode ser visualizada na Tabela 5. É notado que dos 1827 dias do período (2011-2015), em 576 (31,5%) deles foi registrado precipitação, no entanto, durante 310 dias a precipitação registrada foi inferior a 5mm.

Das três cidades que fazem parte da área de estudo deste trabalho, Aracaju, pode-se assim dizer, é a mais seca, pois registra o menor número de dias com precipitação e com menos intensidade. Ainda na tabela 5, nota-se que ocorreram 27 EPE no total, desses, apenas 3 eventos ocorreram entre Novembro e Março, período em que se estudou os casos de VCANs.

Foi constatado que no período de Novembro à Março (2011-2015) a ocorrência de VCANs provocou 46,6% dos EPE (7 de 15) na cidade de Recife. Em Maceió a influência foi de 60%, provocando 3 EPE em um total de 5. E em Aracaju, os VCANs provocaram 66,6% (2 de 3) dos EPE registrados na temporada Novembro/Março durante 2011 à 2015 (Tabelas 3, 4 e 5).

Tabela 3 – Quantidade de dias sem precipitação, com precipitação e com precipitação extrema na cidade de Recife durante janeiro de 2011 à dezembro de 2015.



Fonte: Autor, 2016.

Tabela 4 – Quantidade de dias sem precipitação, com precipitação e com precipitação extrema na cidade de Maceió durante janeiro de 2011 à dezembro de 2015.

| | <input type="checkbox"/> Sem precipitação | <input checked="" type="checkbox"/> Com precipitação | <input checked="" type="checkbox"/> Precipitação extrema (P ₉₅) |
|-----------------|---|--|---|
| Mês 2011 | | | |
| 1 | | | |
| 2 | | | |
| 3 | | | |
| 4 | | | |
| 5 | | | |
| 6 | | | |
| 7 | | | |
| 8 | | | |
| 9 | | | |
| 10 | | | |
| 11 | | | |
| 12 | | | |
| Mês 2012 | | | |
| 1 | | | |
| 2 | | | |
| 3 | | | |
| 4 | | | |
| 5 | | | |
| 6 | | | |
| 7 | | | |
| 8 | | | |
| 9 | | | |
| 10 | | | |
| 11 | | | |
| 12 | | | |
| Mês 2013 | | | |
| 1 | | | |
| 2 | | | |
| 3 | | | |
| 4 | | | |
| 5 | | | |
| 6 | | | |
| 7 | | | |
| 8 | | | |
| 9 | | | |
| 10 | | | |
| 11 | | | |
| 12 | | | |
| Mês 2014 | | | |
| 1 | | | |
| 2 | | | |
| 3 | | | |
| 4 | | | |
| 5 | | | |
| 6 | | | |
| 7 | | | |
| 8 | | | |
| 9 | | | |
| 10 | | | |
| 11 | | | |
| 12 | | | |
| Mês 2015 | | | |
| 1 | | | |
| 2 | | | |
| 3 | | | |
| 4 | | | |
| 5 | | | |
| 6 | | | |
| 7 | | | |
| 8 | | | |
| 9 | | | |
| 10 | | | |
| 11 | | | |
| 12 | | | |

Fonte: Autor, 2016.

Tabela 5 – Quantidade de dias sem precipitação, com precipitação e com precipitação extrema na cidade de Aracaju durante janeiro de 2011 à dezembro de 2015.

| | <input type="checkbox"/> Sem precipitação | <input checked="" type="checkbox"/> Com precipitação | <input checked="" type="checkbox"/> Precipitação extrema (P ₉₅) |
|-----------------|---|--|---|
| Mês 2011 | | | |
| 1 | | | |
| 2 | | | |
| 3 | | | |
| 4 | | | |
| 5 | | | |
| 6 | | | |
| 7 | | | |
| 8 | | | |
| 9 | | | |
| 10 | | | |
| 11 | | | |
| 12 | | | |
| Mês 2012 | | | |
| 1 | | | |
| 2 | | | |
| 3 | | | |
| 4 | | | |
| 5 | | | |
| 6 | | | |
| 7 | | | |
| 8 | | | |
| 9 | | | |
| 10 | | | |
| 11 | | | |
| 12 | | | |
| Mês 2013 | | | |
| 1 | | | |
| 2 | | | |
| 3 | | | |
| 4 | | | |
| 5 | | | |
| 6 | | | |
| 7 | | | |
| 8 | | | |
| 9 | | | |
| 10 | | | |
| 11 | | | |
| 12 | | | |
| Mês 2014 | | | |
| 1 | | | |
| 2 | | | |
| 3 | | | |
| 4 | | | |
| 5 | | | |
| 6 | | | |
| 7 | | | |
| 8 | | | |
| 9 | | | |
| 10 | | | |
| 11 | | | |
| 12 | | | |
| Mês 2015 | | | |
| 1 | | | |
| 2 | | | |
| 3 | | | |
| 4 | | | |
| 5 | | | |
| 6 | | | |
| 7 | | | |
| 8 | | | |
| 9 | | | |
| 10 | | | |
| 11 | | | |
| 12 | | | |

Fonte: Autor, 2016.

5.2 Os casos de VCANs

No período Novembro-Março durante os anos de 2011 à 2015, foram analisados os principais sistemas de escala sinótica que determinaram a ocorrência de precipitações extremas nas área de estudo deste trabalho, conforme descrito na seção 4.5. Nessas análises foi constatado a existência de 6 casos de VCANs. É importante ressaltar que no período analisado ocorreram dezenas de casos de VCANs, no entanto, os que provocaram EPE nas cidades da área de estudo foram exclusivamente esses 6 casos.

Através da Tabela 6 observa-se as datas de início, término e tempo de permanência (em dias) dos 6 casos de VCANs que foram encontrados. É notado que o 4º caso apresentou-se como o mais duradouro, com 16 dias de duração e, os casos de menor permanência foram o 3º e 5º, com duração de 2 dias cada.

Na literatura, nos trabalhos de Kousky e Gan (1981) e de Silva e Lima (2001) é observado que os vórtices mais duradouros surgem no mês de Janeiro, com duração de aproximadamente 15 dias e os de menor permanência surgem no mês de Novembro, com duração de aproximadamente 5 dias.

Tabela 6 – Período de vida dos VCANs: data de início, término e duração em dias.

| Ano / caso | Início | Término | Duração |
|-------------------|-----------------|-----------------|----------------|
| 2011 / 1º caso | 12 de Fevereiro | 21 de Fevereiro | 09 dias |
| 2012 / 2º caso | 15 de Janeiro | 28 de Janeiro | 13 dias |
| 2013 / 3º caso | 03 de Novembro | 05 de Novembro | 02 dias |
| 2013 / 4º caso | 12 de Dezembro | 28 de Dezembro | 16 dias |
| 2014 / 5º caso | 11 de Março | 13 de Março | 02 dias |
| 2015 / 6º caso | 16 de Fevereiro | 25 de Fevereiro | 09 dias |

Fonte: Autor, 2016.

5.3 Análise da posição e deslocamento dos VCANs

Na Figura 8 é mostrado a posição e o deslocamento dos 6 casos de VCANs estudado neste trabalho. O surgimento do VCAN está representado pela cor verde, já a cor vermelha representa o último dia que o vórtice foi observado. As análises foram feitas a cada 24 horas, a partir do surgimento do VCAN. Os pontos foram plotados no centro de cada vórtice.

1º caso (VCAN-1) – O surgimento do VCAN-1 ocorreu sobre o Oceano Atlântico na Latitude 17°S e Longitude 24°W. O deslocamento ocorreu inicialmente no sentido de leste para oeste, do dia-1 até o dia-3, a partir do dia-4 até o dia-6 o deslocamento ocorre de sul para norte e a partir do dia-6 deslocou-se predominantemente de leste para oeste. A dissipação ocorreu no continente, sobre o estado do Mato Grosso, na Latitude 12°S e Longitude 52°W.

2º caso (VCAN-2) - O VCAN-2 surgiu sobre o Oceano Atlântico, próximo à costa do estado da Bahia, na Latitude 13°S e Longitude 37°W. Do dia-1 ao dia-2 o deslocamento ocorreu de norte para sul. Entre o dia-2 e dia-3 o VCAN-2 permaneceu aproximadamente estacionário. Durante o dia-3 ao dia-4 deslocou-se de sul para norte. A partir do dia-4 até o dia-9 se deslocou aproximadamente de norte para sul. E a partir do dia-9 até a dissipação no dia-14 o deslocamento ocorreu aproximadamente de sul para noroeste. O VCAN-2 se dissipou sobre continente, na Latitude 5°S e Longitude 46°W.

3º caso (VCAN-3) - O surgimento do VCAN-3 ocorreu sobre o Oceano Atlântico na latitude 20°S e longitude 34°W. A dissipação também ocorreu sobre o Oceano Atlântico na Latitude aproximada de 13°S e Longitude 37°W. O deslocamento ocorreu aproximadamente no sentido sul-norte.

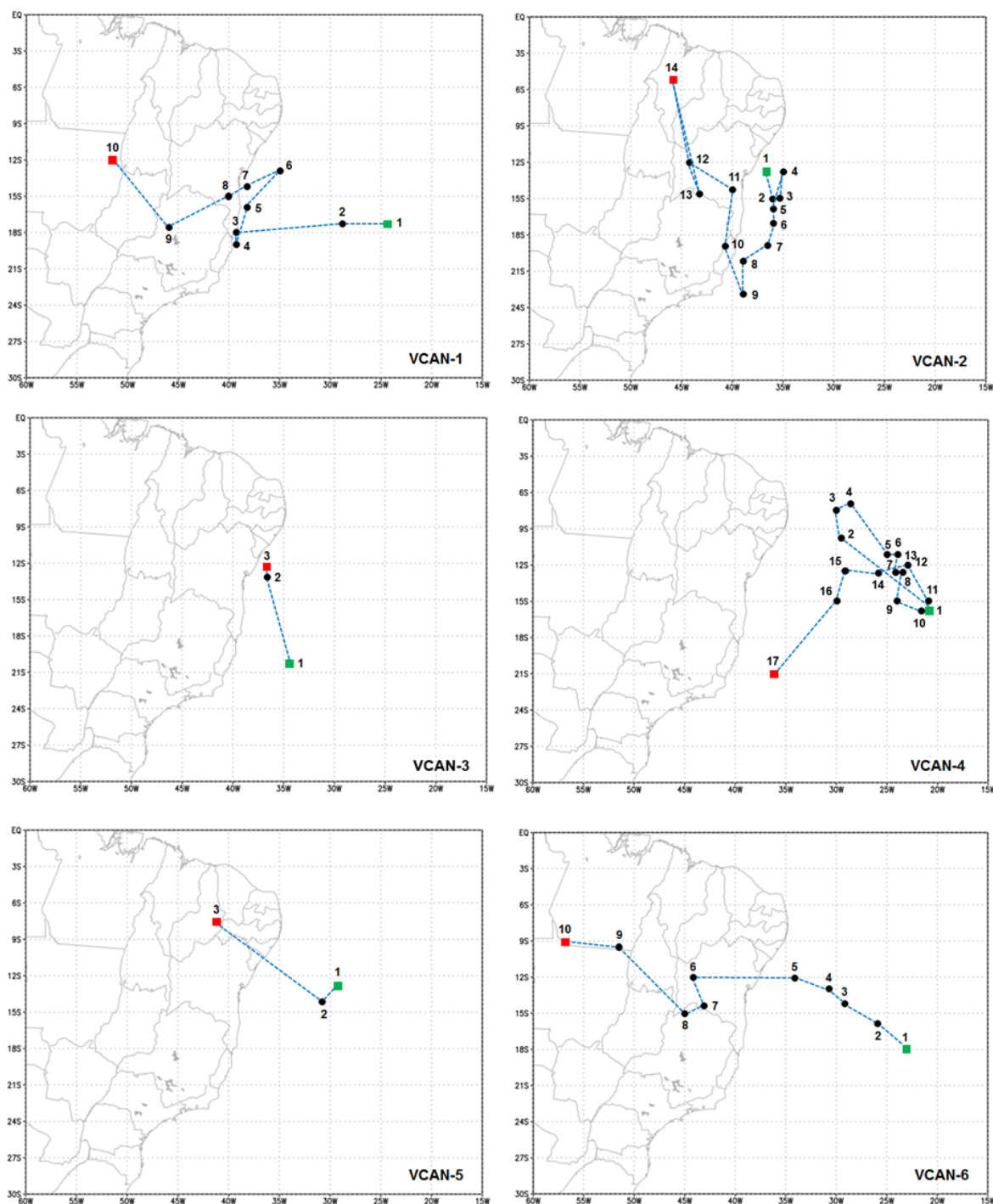
4º caso (VCAN-4) – O VCAN-4 Surgiu sobre o Oceano Atlântico na latitude de 16°S e longitude 21°W. A dissipação ou desconfiguração também ocorreu sobre o Atlântico na Latitude de 21°S e Longitude de 36°W. Inicialmente o deslocamento ocorre aproximadamente para noroeste até dia-3. Do dia-4 ao dia-5 deslocou-se no sentido sudeste e permaneceu quase estacionário entre dia-5 e o dia-8. A partir do dia-15 deslocou-se no sentido sudoeste até a dissipação no dia-17.

5º caso (VCAN-5) – O VCAN-5 surgiu no Oceano Atlântico na Latitude 13°S e Longitude 29°W. Do dia-1 ao dia-2 deslocou-se no sentido sudoeste e do dia-2 ao dia-3 o deslocamento foi no sentido noroeste. A dissipação do VCAN-5 ocorreu sobre o continente na Latitude 7,5°S e Longitude 41°W.

6º caso (VCAN-6) – O surgimento ocorreu sobre o Oceano Atlântico na Latitude 18°S e Longitude 23°W. O deslocamento ocorreu predominantemente no sentido leste-oeste, no entanto, do dia-6 ao dia-8 apresentou um deslocamento no sentido norte-sul. O VCAN-6 se dissipou sobre o continente, entre os estados do Mato Grosso e Pará, na Latitude 9°S e Longitude 57°W.

Segundo critérios estabelecidos por Ramírez et al. (1999), o VCAN-1, VCAN-5 e o VCAN-6 apresentaram deslocamentos regulares, que é caracterizado por um deslocamento predominantemente de leste para oeste. O VCAN-2 e o VCAN-3 podem assim serem descritos como vórtices de deslocamentos irregulares. O VCAN-1 e o VCAN-6 alcançou o setor leste da Amazônia, percorrendo uma longa distância continental (episódio citado na literatura como raro, pelo fato de que ao adentrar no continente o vórtice tende a se dissipar pela destruição da energia cinética).

Figura 8 – Posição e deslocamento dos 6 casos de VCANs que provocaram eventos de precipitação extrema nas cidades de Recife, Maceió e Aracaju durante 2011 à 2015.



Fonte: Autor, 2016.

5.4 Descrição dos casos

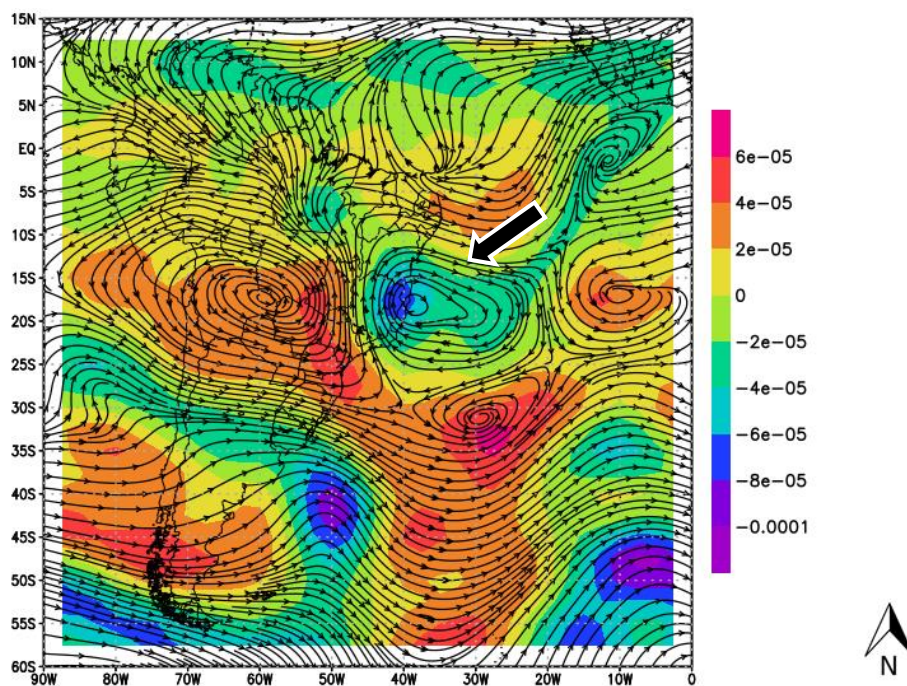
5.4.1 VCAN-1

Observou-se o VCAN-1 pela primeira vez às 06:00 UTC do dia 12 de Fevereiro de 2011 em 200hPa. Na Figura 9, se observa o VCAN-1 às 12:00 UTC do dia 14 com o núcleo próximo à costa sul do estado da Bahia. Notam-se valores de vorticidade relativa variando entre $-6 \times 10^{-5}\text{s}^{-1}$ e $-8 \times 10^{-5}\text{s}^{-1}$, valores considerados altos em termos de intensidade, ou seja, a vorticidade está influenciando o movimento ciclônico, o que consequentemente intensificará o VCAN-1. A AB é notada a leste do VCAN-1, o seu núcleo anticiclônico esteve configurado aproximadamente entre as Latitudes 15°S e 20°S e Longitude 60°W .

No dia 20, às 12:00 UTC, o VCAN-1 é notado com intensidade máxima, aproximadamente entre as Latitudes 14°S e 20°S e entre as Longitudes 42°W e 48°W . É possível afirmar que o VCAN-1 irá se manter configurado ou até mesmo se intensificar ainda mais. Essa afirmação é baseada no campo de vorticidade relativa que apresenta próximo ao centro do vórtice valores negativos intensos, variando entre $-6 \times 10^{-5}\text{s}^{-1}$ e $-10 \times 10^{-5}\text{s}^{-1}$ (Figura 10).

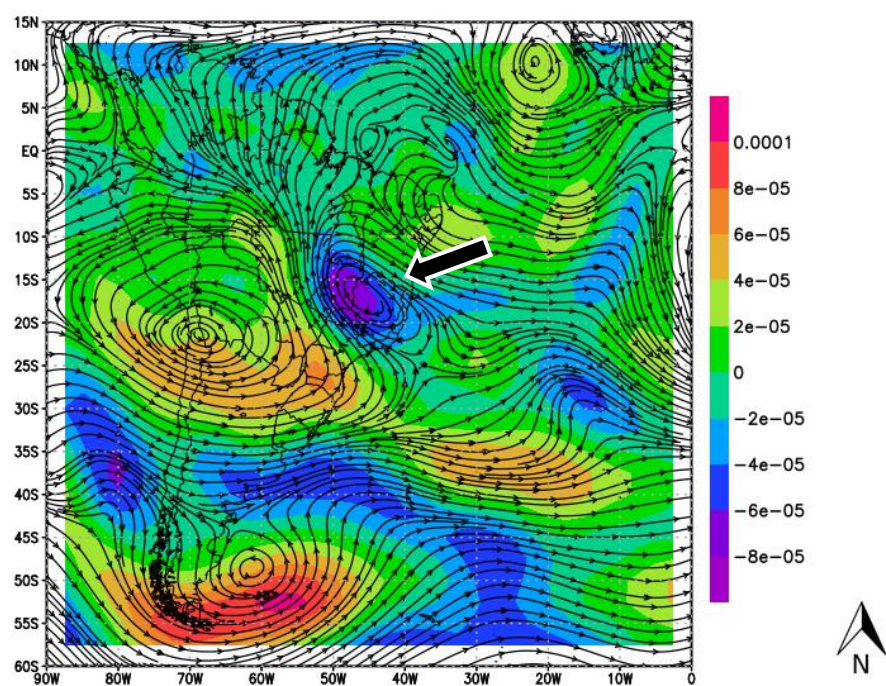
No dia 21 de Fevereiro de 2011, às 12:00 UTC, é possível observar na Figura 11 o VCAN-1 sem intensidade, com o núcleo sobre o nordeste do estado do Mato Grosso, apresentando valores de vorticidade variando entre $-2 \times 10^{-5}\text{s}^{-1}$ e $-4 \times 10^{-5}\text{s}^{-1}$ e com características de desconfiguração. Esse foi o último momento que se notou o vórtice ciclônico ainda configurado, se dissipando logo em seguida.

Figura 9 – Linha de corrente e vorticidade relativa no nível de 200hPa para às 12:00 UTC do dia 14 de Fevereiro de 2011. Seta indicando o núcleo.



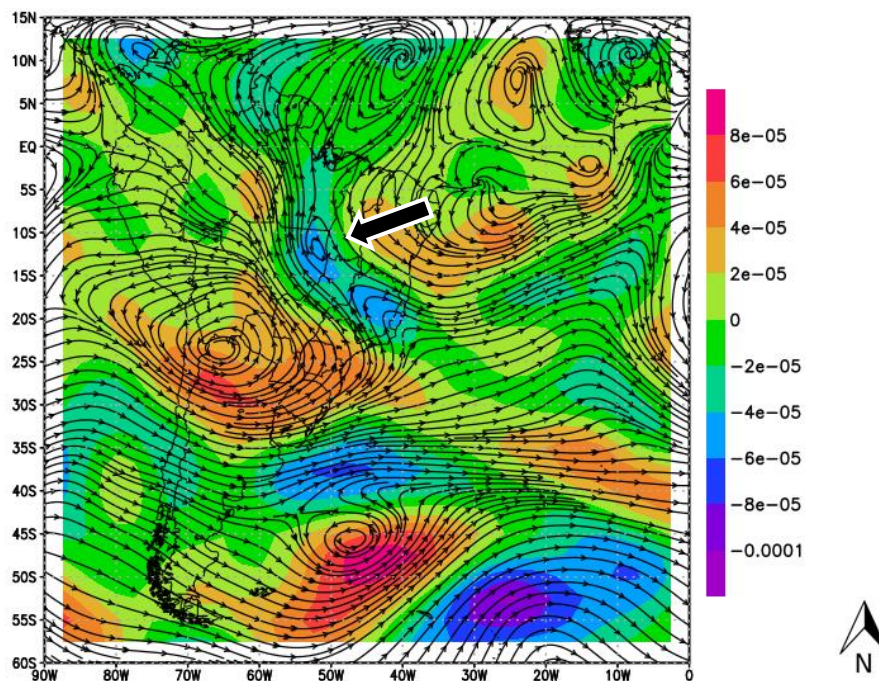
Fonte: Autor, 2016

Figura 10 – Linha de corrente e vorticidade relativa no nível de 200hPa para às 12:00 UTC do dia 20 de Fevereiro de 2011. Seta indicando o núcleo.



Fonte: Autor, 2016.

Figura 11 – Linha de corrente e vorticidade relativa no nível de 200hPa para às 12:00 UTC do dia 21 de Fevereiro de 2011. Seta indicando o núcleo.

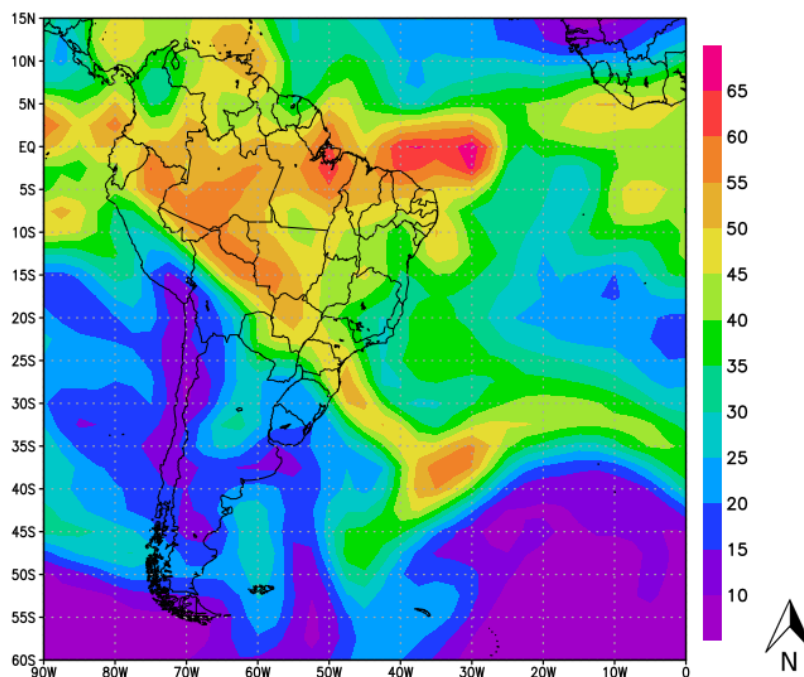


Fonte: Autor, 2016.

A Figura 12 mostra o campo de água precipitável para às 12:00 UTC do dia 14 de Fevereiro de 2011. Observa-se uma faixa com valores elevados (entre 45mm e 60mm) que se estende desde a Amazônia até o Atlântico Sul, essa faixa está relacionada a ocorrência da ZCAS, sendo possível afirmar que esse sistema esteve associada ao VCAN-1. Nas cidades de Recife, Maceió e Aracaju observam-se valores entre 45mm e 50mm. Notam-se na periferia norte do VCAN-1 (região do Atlântico Equatorial) valores entre 60mm e 70mm, indicando forte atividade convectiva.

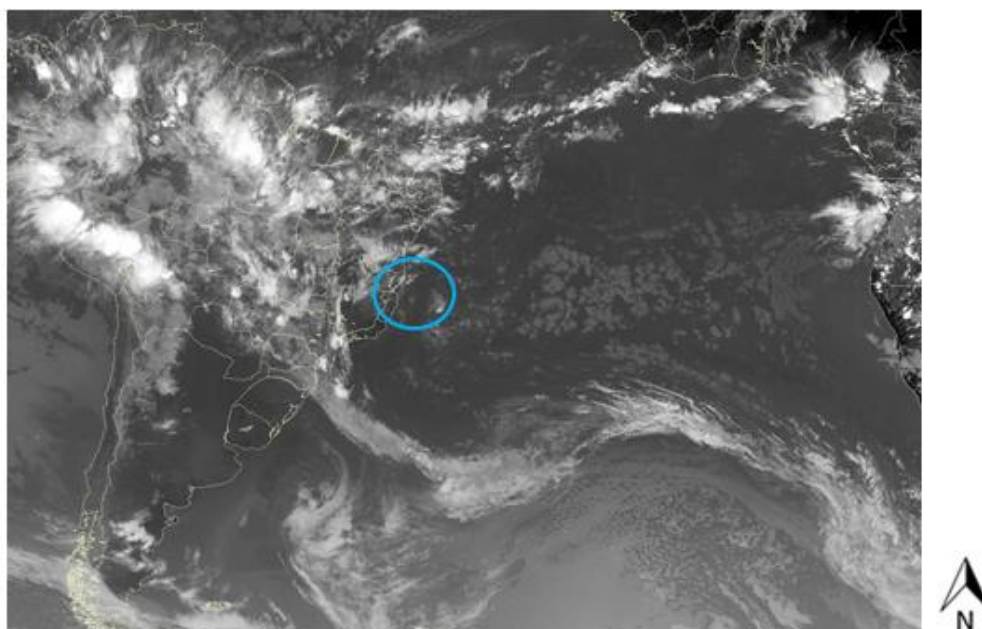
Na Figura 13, observa-se a nebulosidade associada a ocorrência do VCAN-1 juntamente com a ZCAS e AB, cobrindo a maior parte do território brasileiro e também da América do Sul. Ao longo do período de vida, o VCAN-1 apresentou uma configuração da nebulosidade diferente da descrita por Kousky e Gan (1981), que é em forma de “S”.

Figura 12 – Água precipitável (mm) para às 12:00 UTC do dia 14 de Fevereiro de 2011.



Fonte: Autor, 2016.

Figura 13 – Imagem composta dos satélite GOES-12 + METEOSAT-09 no canal espectral infravermelho para às 18:00 UTC do dia 14 de Fevereiro de 2011. Círculo em azul simboliza a localização aproximada do vórtice ciclônico em 200hPa.



Fonte: Adaptado do CPTEC/INPE, 2016.

Nos dias de maior precipitação em Recife (13, 14 e 20) o valor do CAPE, calculado pela radiossonagem, variou entre 1150 J/Kg à 3968 J/Kg, indicando que a

atmosfera em Recife estava de moderadamente instável a extremamente instável nesses dias. Os valores registrados do Índice K variou entre 23° à 35°, um indicativo de formação de cumulonimbus isoladas à esparsas (Tabela 7).

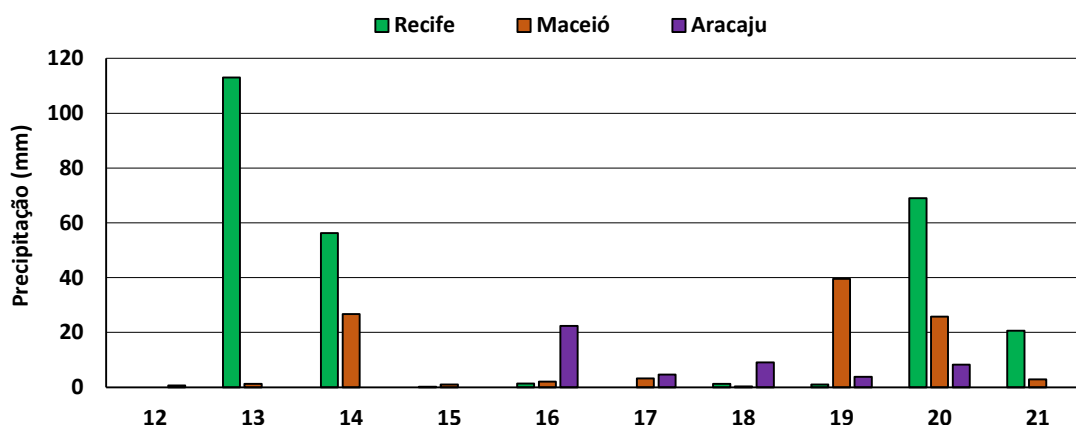
Tabela 7 – CAPE e Índice K às 12:00 UTC dos dias 13, 14, 19 e 20 de Fevereiro de 2011.

| Data | CAPE (J/Kg) | Índice K (°C) |
|------------|-------------|---------------|
| 13/02/2011 | 3968 | 33 |
| 14/02/2011 | 2388 | 23 |
| 19/02/2011 | 89 | 35 |
| 20/02/2011 | 1150 | 35 |

Fonte: CPTEC/INPE

A Figura 14 mostra a precipitação ocorrida durante o período de vida do VCAN-1, de 12 a 21 de Fevereiro de 2011. Este VCAN provocou 3 EPE na cidade de Recife, dias 13, 14 e 20 e provocou 1 EPE na cidade de Maceió, no dia 19. Durante o VCAN-1 houve o registro pela estação do INMET de 262,6 mm de precipitação na cidade de Recife, ou seja, em apenas nove dias precipitou o dobro da precipitação média (1986-2015) para todo o mês de Fevereiro.

Figura 14 – Precipitação diária na área de estudo (Recife, Maceió e Aracaju) durante o período de vida do VCAN-1, de 12 a 21 de Fevereiro de 2011.

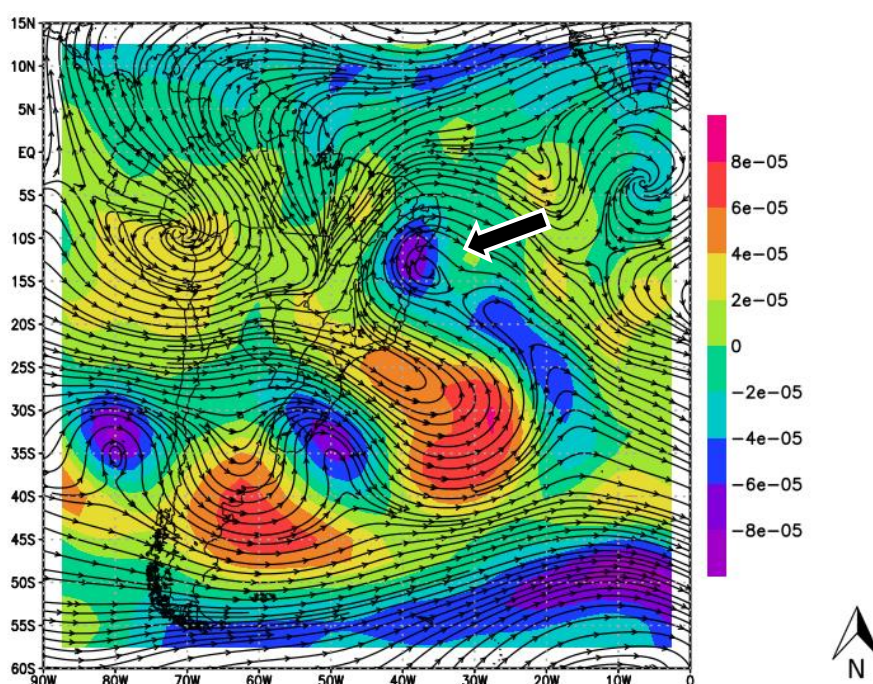


Fonte: Autor, 2016.

5.4.2 VCAN-2

Às 12:00 UTC do dia 15 de Janeiro de 2012 o VCAN-2 surgiu na costa do estado da Bahia, aproximadamente entre as Latitudes 10°S e 15°S, visto na Figura 15. Observam-se na região do núcleo, valores negativos intensos de vorticidade relativa, os mais altos variando entre -6×10^{-5} e -8×10^{-5} , dando o indicativo de que o vórtice irá de manter configurado ou se intensificar.

Figura 15 – Campo composto de linha de corrente e vorticidade relativa no nível de 200hPa para às 12:00 UTC do dia 15 de Janeiro de 2012.



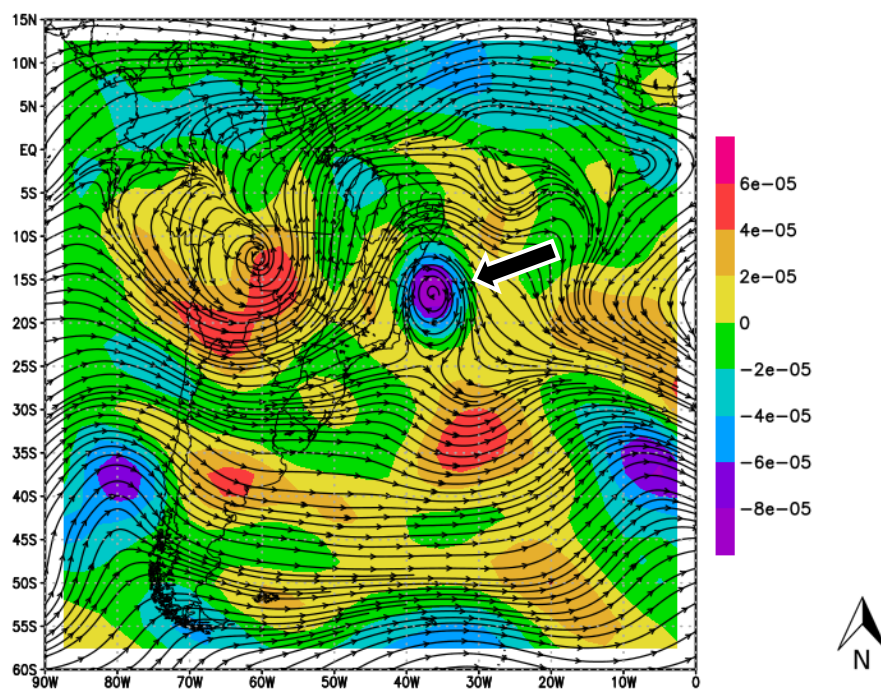
Fonte: Autor, 2016

Às 12:00 UTC do dia 20 de Janeiro de 2012, observa-se na Figura 16 o VCAN-2 em seu desenvolvimento máximo, com o núcleo localizado aproximadamente entre as Latitudes 12°S e 18°S e entre as Longitudes 33°W e 39°W. A vorticidade relativa apresenta valores intensos no centro do vórtice, entre -6×10^{-5} e -10×10^{-5} .

Ainda na Figura 16, a AB pode ser vista com seu núcleo anticiclônico sobre os estados de Rondônia e Mato Grosso, aproximadamente na Latitude 12°S e Longitude 60°W. Percebem-se valores positivos de vorticidade relativa próximo ao núcleo e na

periferia, os mais elevados variando entre $4 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ e $6 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$, indicando a tendência do ar girar no sentido anti-horário.

Figura 16 – Campo composto de linha de corrente e vorticidade relativa no nível de 200hPa para às 12:00 UTC do dia 20 de Janeiro de 2012.

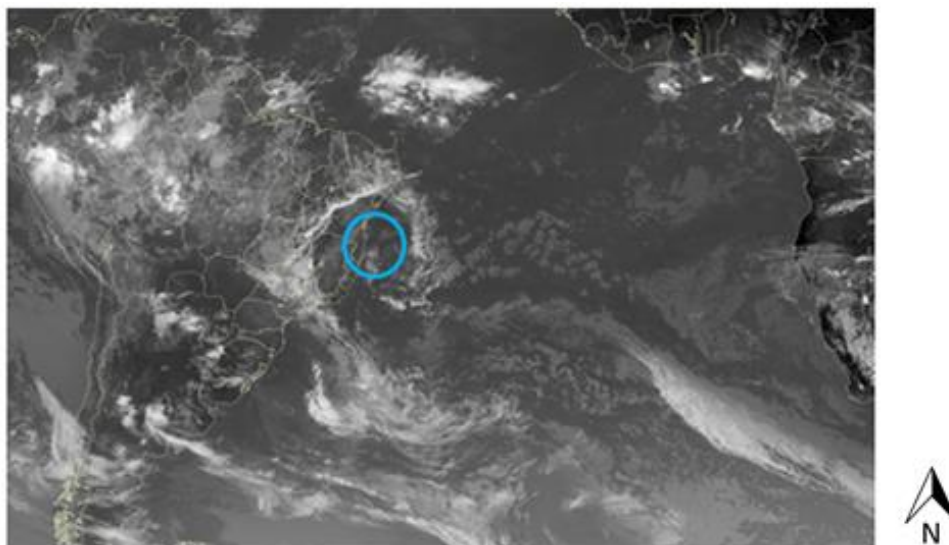


Fonte: Autor, 2016.

Observa-se na imagem de satélite a nebulosidade associada ao VCAN-2 sobre o NEB, com seu núcleo sobre a costa do estado da Bahia (Figura 17). Nota-se que na região próximo ao núcleo do VCAN não há ocorrência de nuvens convectivas, fato não visto na periferia do vórtice, onde se nota instabilidade, com desenvolvimento de nuvens convectivas. O VCAN-2 esteve associado a um sistema frontal, desenvolvido no Atlântico sul, condizente ao mecanismo de formação proposto por Kousky e Gan (1981).

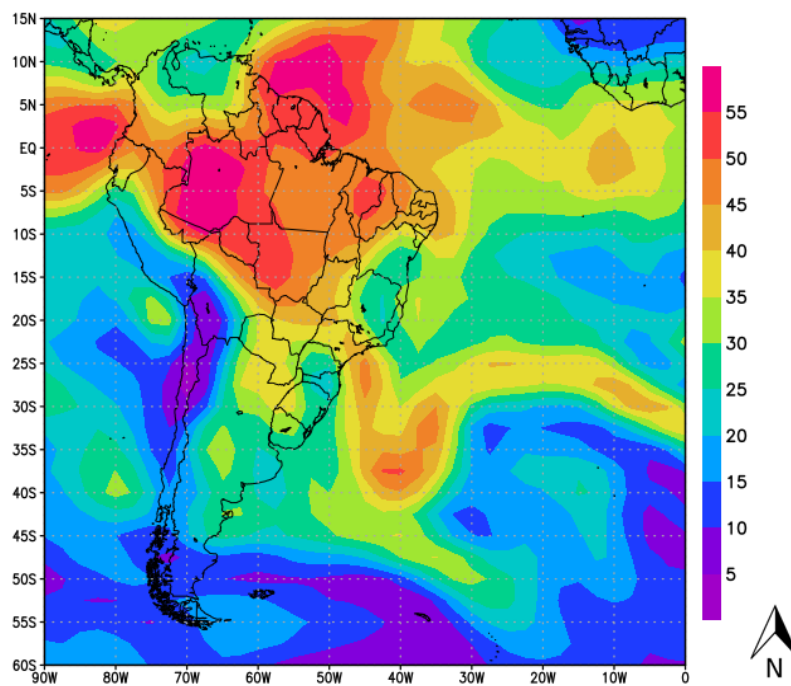
Na Figura 18 pode ser visto o campo de água precipitável para às 12:00 UTC do dia 20 de Janeiro de 2012, data a qual se registou a maior precipitação diária na área de estudo. Observam-se valores entre 40mm e 45mm sobre Recife e Maceió e entre 35mm e 40mm em Aracaju. Na área sob influência do núcleo e na periferia sudeste percebe-se valores mais baixos, condizente com a configuração na nebulosidade.

Figura 17 – Imagem composta dos satélite GOES-12 + METEOSAT-09 no canal espectral infravermelho para às 12:00 UTC do dia 20 de Janeiro de 2012. Círculo em azul simboliza a localização aproximada do vórtice ciclônico em 200hPa.



Fonte: Adaptado do CPTEC/INPE, 2016.

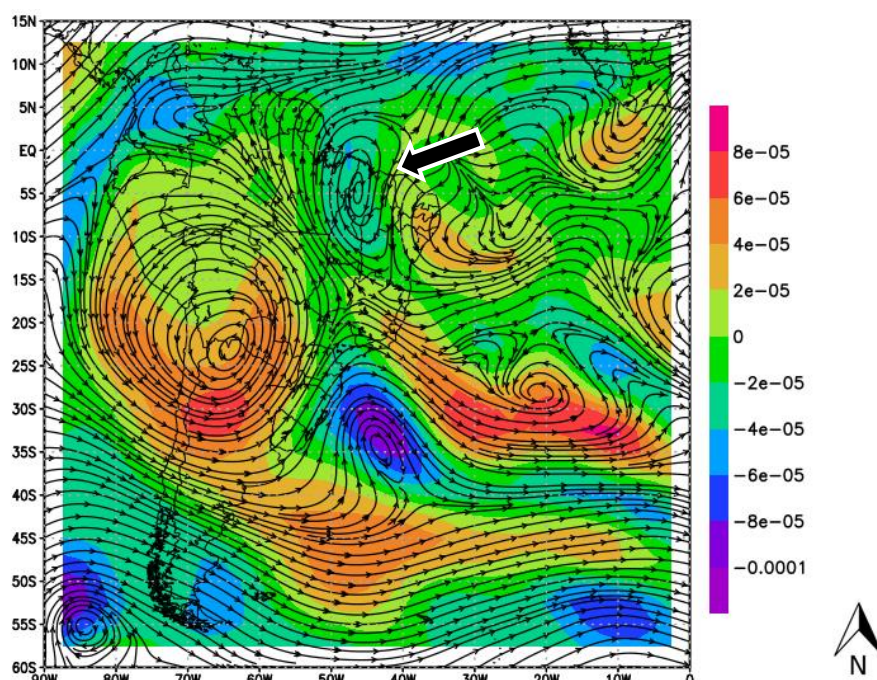
Figura 18 – Água precipitável (mm) para às 12:00 UTC do dia 20 de Janeiro de 2012.



Fonte: Autor, 2016.

Na Figura 19 o centro do vórtice é visto sobre o noroeste do estado Maranhão às 12:00 UTC do dia 28 de Janeiro de 2012. Considerando-se que os valores de vorticidade relativa estão entre $-2 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ e $-4 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$, pode-se afirmar que o VCAN-2 está sem intensidade e tenderá a se dissipar, o que foi confirmado, pois VCAN-2 não foi mais observado após esse momento. A AB é vista com o núcleo anticiclônico configurado sobre o norte da Argentina. Também é possível observar o surgimento de um VCAN do tipo Palmén, aproximadamente na Latitude 35°S e Longitude 45°W .

Figura 19 – Campo composto de linha de corrente e vorticidade relativa no nível de 200hPa para às 12:00 UTC do dia 28 de Janeiro de 2012.

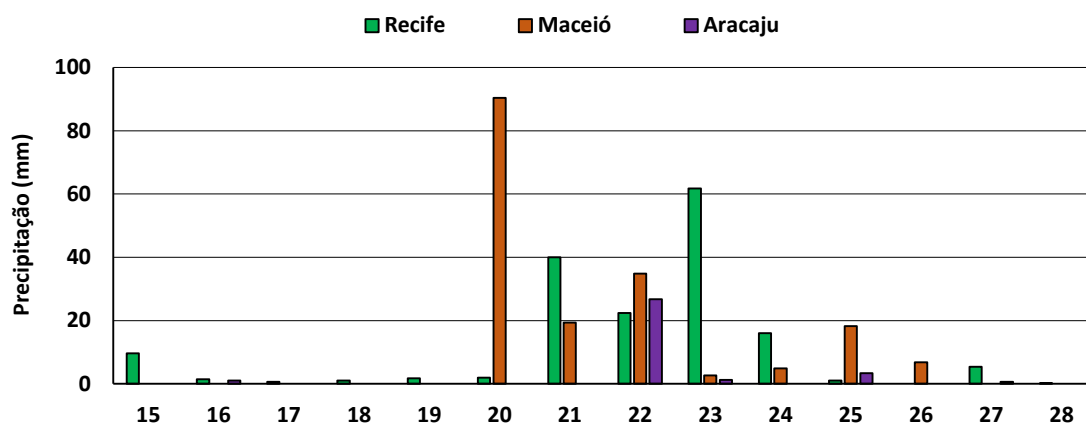


Fonte: Autor, 2016

O VCAN-2 permaneceu ativo durante um período de 13 dias, de 15 a 28 de Janeiro de 2012. A Figura 20 mostra a precipitação diária durante esse período. Nota-se a ocorrência de 2 EPE, um no dia 20 na cidade Maceió e outro no dia 23 na cidade de Recife. A precipitação registrada em Maceió no dia 20 foi igual a 90,4mm, esse valor é a maior precipitação diária registrada no mês de Janeiro desde 1986. Nas cidades de Recife e Maceió, ocorreram precipitação acima da média para o mês de Janeiro. Em Maceió,

apenas no dia 20, precipitou 10% acima da média (1986-2015) para todo o mês. E no acumulado dos 13 dias, registrou-se 177,2mm em Maceió, cerca de 110% acima do que é esperado para Janeiro, que é 84,3mm. Em Recife, durante o VCAN-2, precipitou 163,2mm, sendo que a média (1986-2015) para Janeiro é de 105mm.

Figura 20 – Precipitação diária (24h) na área de estudo (Recife, Maceió e Aracaju) durante o período de vida do VCAN-2, de 15 à 28 de Janeiro de 2012.



Fonte: Autor, 2016.

A Tabela 8 mostra os valores do CAPE e do Índice K obtidos pela rediossondagem realizada em Recife. É possível afirmar que nos dias 20 e 21 a atmosfera em Recife estava pouco instável com formação de Cumulonimbus muito esparsas. Nos dias 22 e 23 a atmosfera estava moderadamente instável com formação de Cumulonimbus esparsas.

Tabela 8 – Valores de CAPE e Índice K na estação de Recife para às 12:00 UTC dos dias 20, 21, 22 e 23 de Janeiro de 2012.

| Data | CAPE (J/Kg) | Índice K (°C) |
|------------|-------------|---------------|
| 20/01/2012 | 810 | 26 |
| 21/01/2012 | 641 | 32 |
| 22/01/2012 | 1001 | 34 |
| 23/01/2012 | 1082 | 35 |

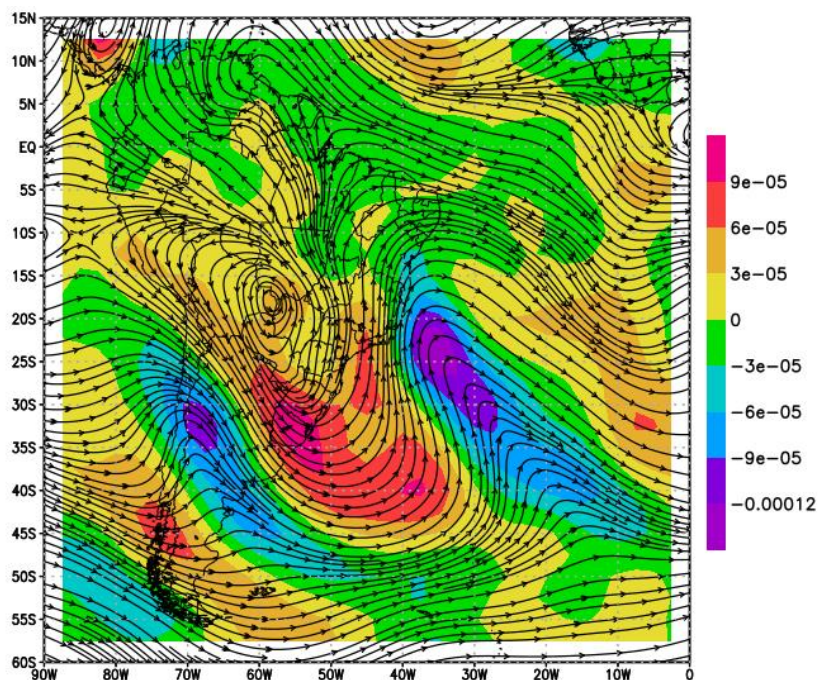
Fonte: CPTEC/INPE.

5.4.3 VCAN-3

Na Figura 21, observa-se às 06:00 UTC do dia 2 de Novembro de 2013 próximo à costa da Região Sudeste do Brasil um cavado com valores intensos de vorticidade relativa, que variam entre -9×10^{-5} e -12×10^{-5} . Às 00:00 UTC do dia 3 de Novembro de 2013 foi observado nessa região o surgimento de um vórtice ciclônico fechado (início do VCAN-3). Isso mostra que 18 horas antes de se notar o início do VCAN-3 já era possível se prever que na região que mostrava os valores negativos intensos de vorticidade relativa se formaria um vórtice ciclônico.

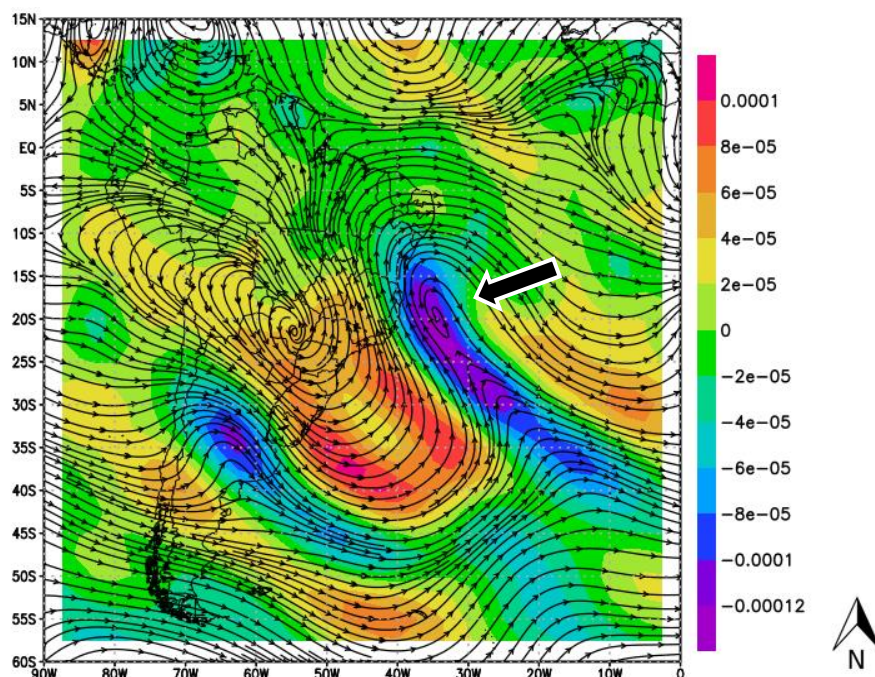
O surgimento do VCAN-3, dado pelo mecanismo Clássico, pode ser observado na Figura 22, quando se nota um vórtice ciclônico em 200hPa, próximo à costa sul do estado da Bahia, na Latitude 20°S e Longitude 34°W .

Figura 21 – Linhas de corrente e vorticidade relativa no nível de 200hPa para às 06:00 UTC do dia 02 de Novembro de 2013.



Fonte: Autor, 2016.

Figura 22 – Linhas de corrente e vorticidade relativa no nível de 200hPa para às 00:00 UTC do dia 03 de Novembro de 2013.

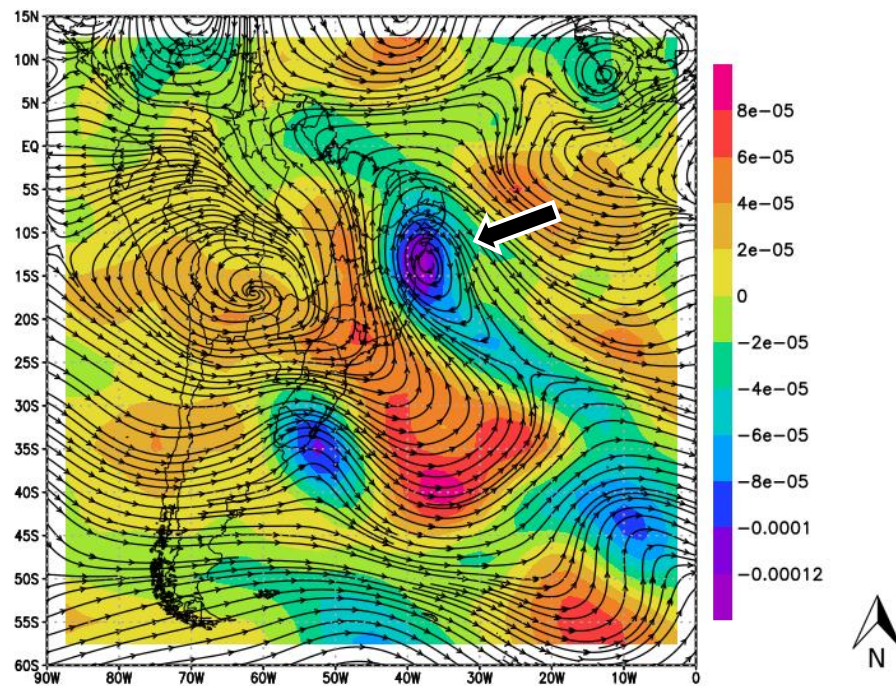


Fonte: Autor, 2016.

No dia 4 de Novembro de 2013, às 00:00 UTC, o centro do VCAN-3 é notado no litoral da Bahia, entre as Latitudes 10°S e 15°S e entre as Longitudes 35°W e 40°W. A vorticidade relativa apresenta valores entre $-10 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ e $-12 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$, os mais intensos já observados até o momento dentre os casos estudados (Figura 23).

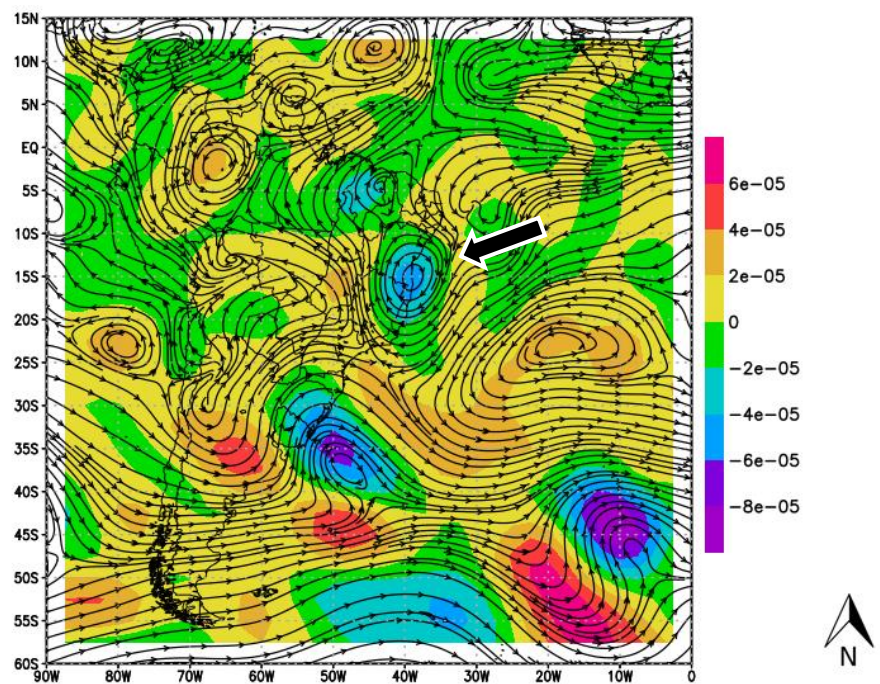
Para o mesmo horário e dia (00:00UTC do dia 4) é mostrado na Figura 24 o campo composto de linhas de corrente e vorticidade relativa para o nível de 600hPa. Percebe-se que o vórtice ciclônico pôde ser visto nos médios níveis da troposfera (600hPa), indicando que o VCAN-3 foi o mais profundo de todos os casos estudados. Segundo Gan (1982) os VCANs que ficam confinados na alta troposfera, acima de 400hPa, possuem pouca ou nenhuma nebulosidade, enquanto os que atingem níveis mais baixos, possuem nebulosidade muita intensa.

Figura 23 – Linhas de corrente e vorticidade relativa no nível de 200hPa para às 00:00 UTC do dia 04 de Novembro de 2013.



Fonte: Autor, 2016.

Figura 24 – Linhas de corrente e vorticidade relativa no nível de 600hPa para às 00:00 UTC do dia 04 de Novembro de 2013.

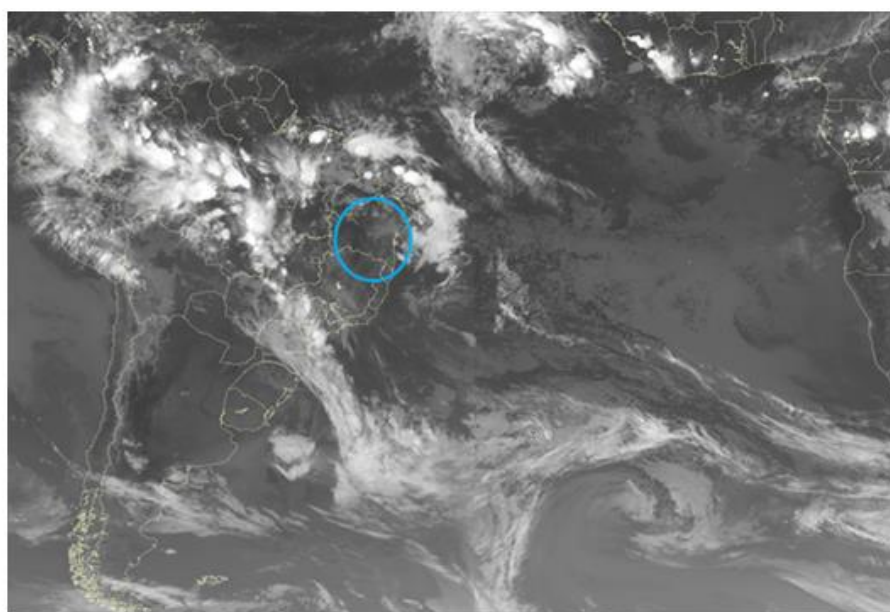


Fonte: Autor, 2016.

A nebulosidade associada ao VCAN-3 obedece um padrão característico visto na maioria dos VCANs, com o centro do vórtice sobre o continente, o qual é caracterizado por “céu claro” devido aos movimentos descendentes de ar que inibe a formação de nebulosidade convectiva. Já na periferia há instabilidade atmosférica e muita nebulosidade.

Na Figura 25 percebe-se que a nebulosidade associada ao VCAN-3 cobre praticamente toda a parte litorânea do NEB, deixando o interior sem nuvens convectivas. O núcleo ciclônico está aproximadamente sobre o estado da Bahia. O VCAN-3 se desenvolveu a partir da penetração de um sistema frontal nos subtrópicos, como foi descrito por Kouky e Gan (1981).

Figura 25 – Imagem composta dos satélites GOES-13 + METEOSAT-10 no canal espectral infravermelho (IR) para às 00:00 dia 04 de Novembro de 2013. Círculo em azul simboliza a localização aproximada do vórtice ciclônico em 200hPa.

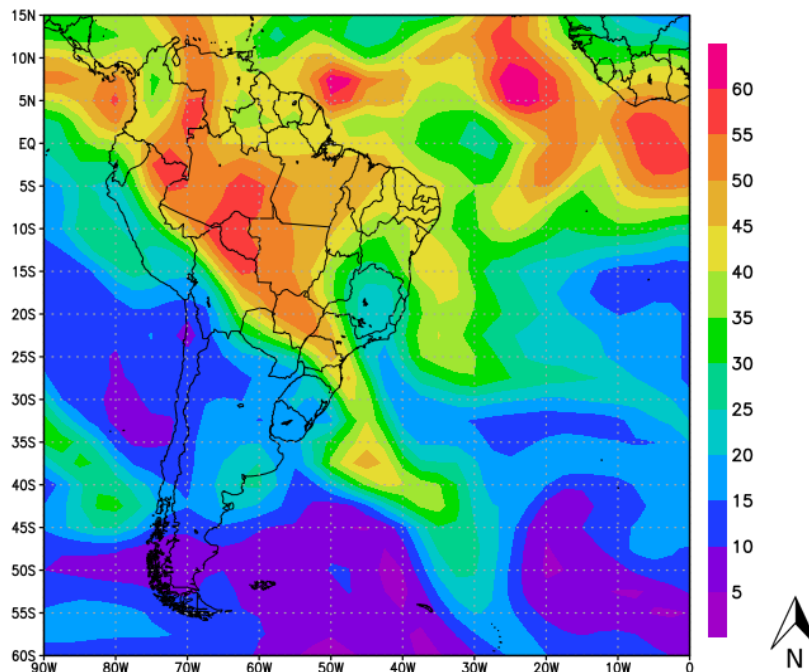


Fonte: Adaptado do CPTEC/INPE, 2016.

No campo de água precipitável (Figura 26) percebem-se os valores mais intensos na periferia oeste do VCAN-4, entre 45mm e 55mm. No estado de Sergipe, periferia leste, percebem-se valores entre 40mm e 45mm. Nota-se áreas com valores intensos sobre o

Atlântico Equatorial, aproximadamente entre as Latitudes 0° e 10°N , indicando forte atividade convectiva, possivelmente áreas em que a ZCIT está atuando.

Figura 26 – Água precipitável (mm) para às 00:00 UTC do dia 04 de Novembro de 2013.



Fonte: Autor, 2016.

O VCAN-3 provocou 1 EPE na cidade de Aracaju no dia 04 de Novembro de 2013, igual a 135,4mm, visto na Figura 27. Para se ter uma ideia de quão extrema foi essa precipitação do dia 04, apenas nos meses da quadra chuvosa de Aracaju, a precipitação média é superior a 135,4mm.

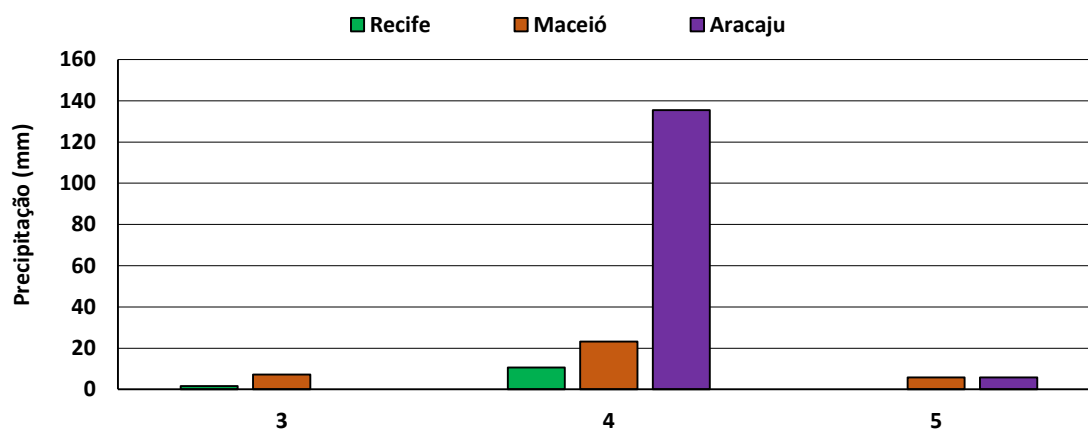
Para o mês de Novembro, a precipitação média (1986-2015) é 44,4 mm, aproximadamente 1/3 da precipitação registrada no dia 4/Nov. Pode-se afirmar então que, essa foi a maior precipitação diária já registrada em Aracaju no segundo semestre dos últimos 30 anos.

Pela radiossondagem realizada em Recife, às 12:00 UTC do dia 04 de Novembro de 2013, houve o registro de CAPE igual a 2338 J/Kg. Na radiossondagem realizada em Salvador para a mesmo horário e dia, registrou-se 2578 J/Kg de CAPE, um indicativo de

que tanto a atmosfera em Recife quanto em Salvador estava moderadamente instável. Sendo uma referência para caracterizar as condições de tempo da cidade de Aracaju.

Uma reportagem do Portal de Notícias da Globo/Sergipe, relata que “*a chuva que atingiu Aracaju (SE) e região metropolitana na madrugada dessa segunda-feira (4), veio acompanhada de raios e trovoadas, que são fenômenos raros em Sergipe*”. Houve registro de quedas de árvores, alagamentos em diversas ruas de Aracaju e muitos condomínios tiveram as garagens invadidas pela água da chuva, deixando vários carros submersos.

Figura 27 – Precipitação diária (24h) na área de estudo (Recife, Maceió e Aracaju) durante o período de vida do VCAN-3, de 03 à 05 de Novembro de 2013.

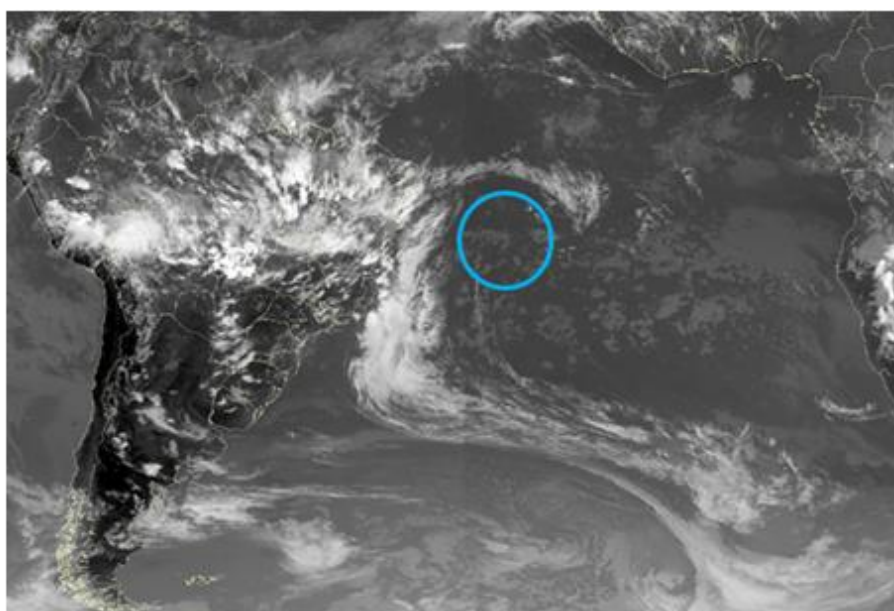


Fonte: Autor, 2016.

5.4.4 VCAN-4

O VCAN-4 surgiu e se dissipou sobre o Oceano Atlântico. O centro do vórtice permaneceu praticamente todo o tempo entre as Longitudes 20°W e 30°W, por esse fato, constatou-se que durante o período de vida, a nebulosidade associada a este VCAN (periferia leste - região de muita instabilidade) cobriu todo o NEB, fato incomum visto na maioria dos VCANs, que tem o vórtice localizado sobre o continente. Observa-se a ocorrência da ZCAS, desde o continente sul americano até a costa sul do continente africano. Esse sistema esteve associado ao VCAN-3 (Figura 28).

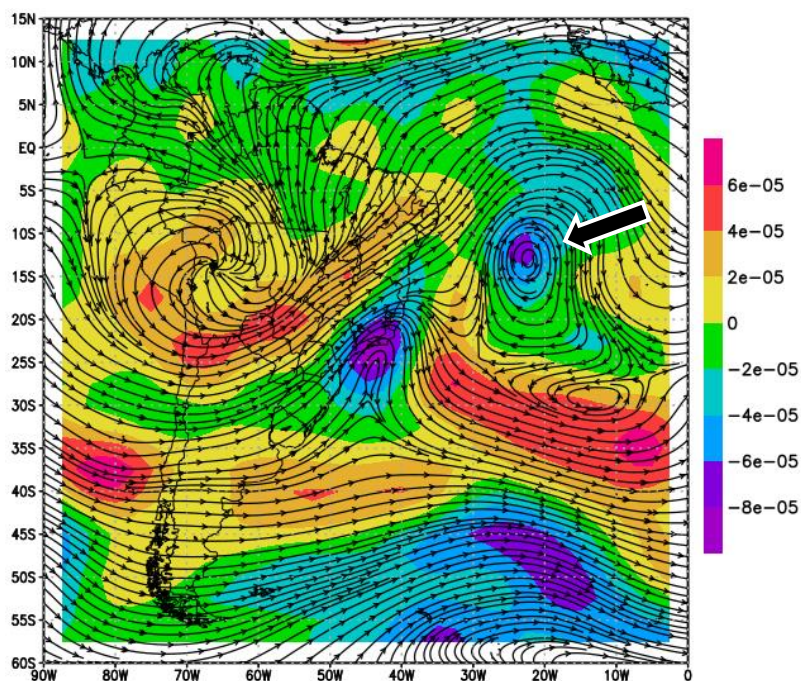
Figura 28 - Imagem composta dos satélites GOES-13 + METEOSAT-09 no canal espectral infravermelho para às 12:00 UTC do dia 19 de Dezembro de 2013. Círculo em azul simboliza a localização aproximada do vórtice ciclônico em 200hPa.



Fonte: Adaptado do CPTEC/INPE, 2016.

No dia 19 de Dezembro de 2013, o VCAN-4 é observado em 200hPa aproximadamente entre as latitudes 10°S e 15°S e entre as longitudes 18°W e 24°W. Observa-se no centro do vórtice os valores mais elevados de vorticidade relativa variando entre $-6 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ e $-8 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ (Figura 29).

Figura 29: Linha de corrente e vorticidade relativa no nível de 200hPa para às 12:00 UTC do dia 19 de Dezembro de 2013.

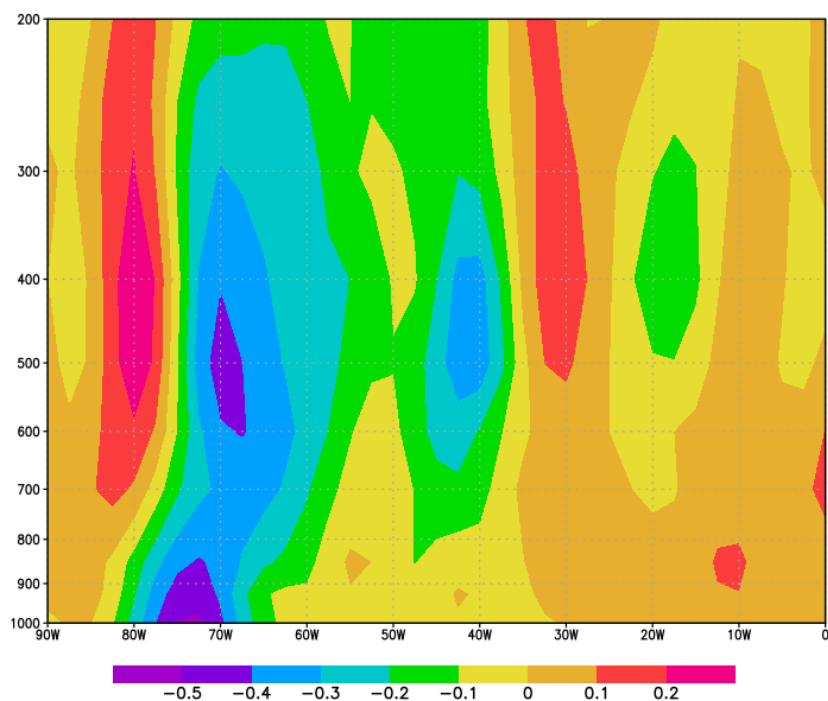


Fonte: Autor, 2016.

O campo de velocidade vertical (Figura 30) mostra que para o dia 19 de Dezembro de 2013, na região sob influência do núcleo do VCAN-4, aproximadamente entre as Longitudes 20°W e 35°W, há predominância de movimentos descendentes, representado por valores positivos. Já na periferia oeste do VCAN-4, aproximadamente entre 35°W e 50°W, ocorrem movimentos ascendentes, características de instabilidade atmosférica.

É possível afirmar o desenvolvimento de nuvens cumulunimbus, aproximadamente entre as Longitudes 60°W e 75°W, devido aos movimentos ascendentes desde os baixos aos altos níveis da troposfera, no entanto, essa região está sob influência da AB, e não pode ser considerada como periferia do VCAN-4.

Figura 30 – Seção vertical longitudinal na latitude de 12,5°S do campo de velocidade vertical (omega) para às 12:00 UTC do dia 19 de Dezembro de 2013.

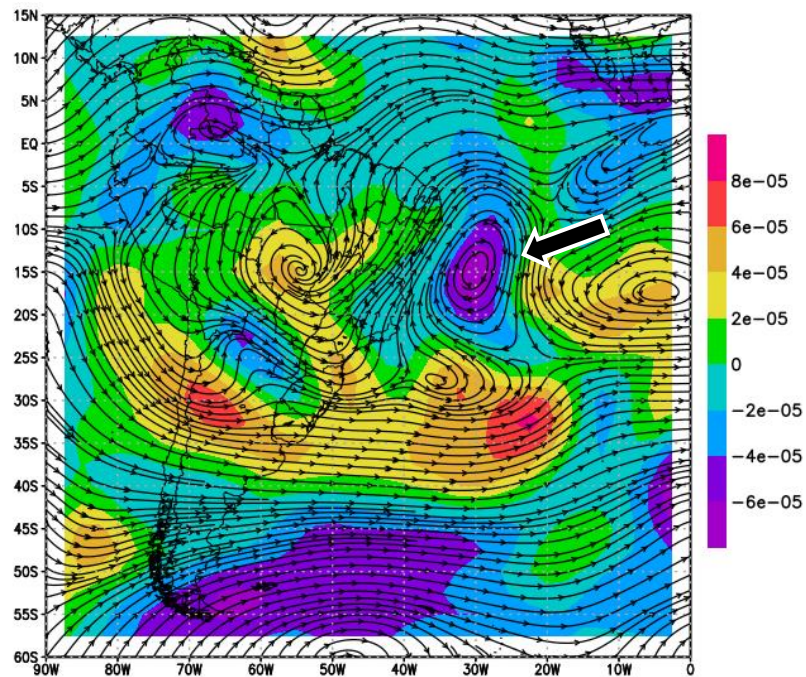


Fonte: Autor, 2016.

No dia 27, nota-se o núcleo do VCAN-4 localizado aproximadamente na latitude 15°S e longitude 30°W (Figura 31). É possível afirmar que o vórtice está com desenvolvimento intenso, pelo fato da vorticidade relativa está apresentando valores entre $-6 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ e $-8 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$. Então, o vórtice tende a permanecer configurado, pois não se percebe-se diminuição do campo de vorticidade.

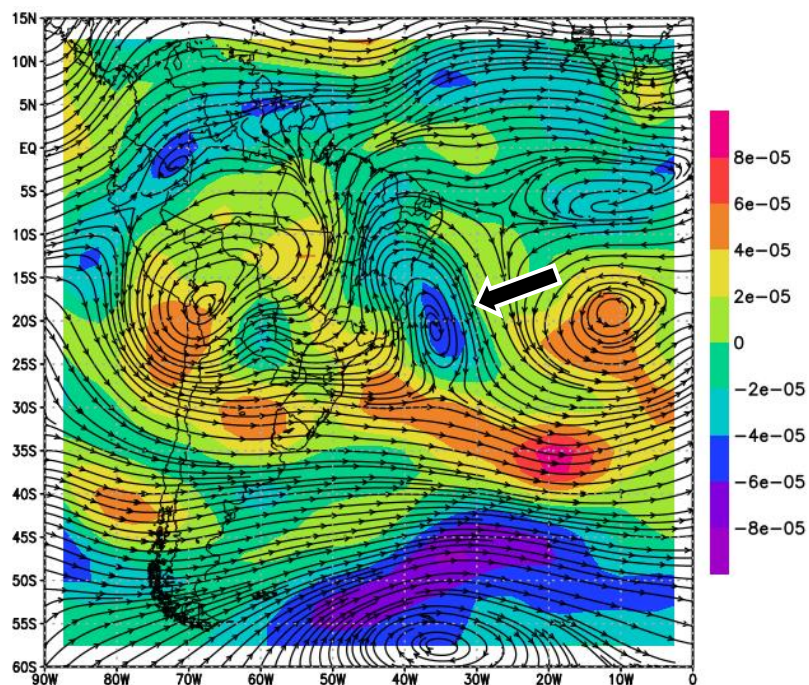
Na Figura 32, representando a vorticidade relativa e linhas de corrente em 200hPa para às 18: UTC do dia 28, se observa na região do centro do VCAN-4 uma diminuição no valor da vorticidade, características que indica que o vórtice tende a perder intensidade, ou até mesmo se desconfigurar. Isto se confirma, pois o VCAN-4 não é mais visualizado em horário posterior às 18:00 UTC do dia 28 de Dezembro de 2013.

Figura 31: Linha de corrente e vorticidade relativa no nível de 200hPa para às 12:00 UTC do dia 27 de Dezembro de 2013.



Fonte: Autor, 2016.

Figura 32: Linha de corrente e vorticidade relativa no nível de 200hPa para às 18:00 UTC do dia 28 de Dezembro de 2013.

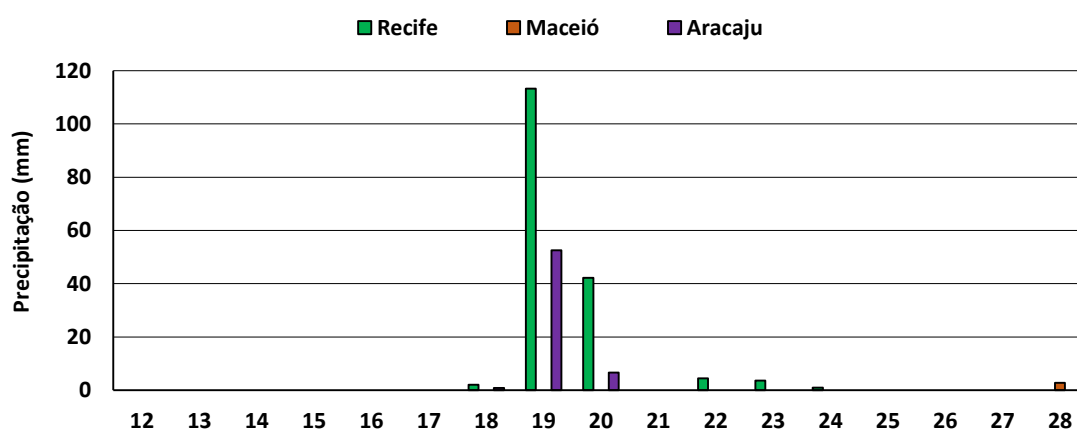


Fonte: Autor, 2016.

Na Figura 33 é observada a precipitação diária registrada nas cidades de Recife, Maceió e Aracaju durante o período de vida do VCAN-4, de 12 a 28 de Dezembro de 2013. Nota-se que ocorreram 2 EPE em Recife, dias 19 e 20 e nota-se 1 EPE ocorrido em Maceió, dia 19.

A precipitação média (1986-2015) para o mês de Dezembro em Recife é 57,4mm e em Maceió é 34,4mm. Apenas no dia 19, a precipitação registrada na cidade de Recife foi o dobro do esperado para todo o mês de Dezembro. Em Maceió a precipitação do dia 20 também foi 8mm superior ao esperado para todo o mês.

Figura 33 – Precipitação diária ocorrida na área de estudo (Recife, Maceió e Aracaju) durante o período de vida do VCAN-4, de 12 à 28 de Dezembro de 2013.



Fonte: Autor, 2016.

Nota-se na Tabela 9, valores de CAPE e do Índice K registrados pela radiossondagem realizada em Recife nos dias de maior precipitação (19 e 20) durante o VCAN-4. Observa-se no dia 19, 3519 J/Kg de CAPE e Índice K igual a 37°, um indicativo de que a atmosfera estava extremamente instável com formação de nuvens cumulonimbus numerosas. No dia 20, pode-se afirmar que a atmosfera estava pouco instável com formação de cumulonimbus esparsas.

Tabela 9 – Valores de CAPE e Índice K na estação de Recife para às 12:00 UTC dos dias 19 e 20 de Dezembro de 2013.

| Data | CAPE (J/Kg) | Índice K (°C) |
|-------------|--------------------|----------------------|
| 19/12/2013 | 3519 | 615 |
| 20/12/2013 | 37 | 33 |

Fonte: CPTEC/INPE

A precipitação associada ao VCAN-4 provocou diversos impactos na Cidade do Recife (Figura 34). Uma reportagem do Jornal diário de Pernambuco no dia 19 de Dezembro de 2013 relata que as chuvas que atingiram o Recife na madrugada do dia 19 causaram quatro deslizamentos de barreiras além de provocar alagamentos em várias vias da cidade e queda de árvores no bairro Poço da Panela e no campus da UFPE. Não houve registros de mortes humanas.

Figura 34 – Imagens de impactos causados pela precipitação extrema na cidade de Recife no dia 19 de Dezembro de 2013.

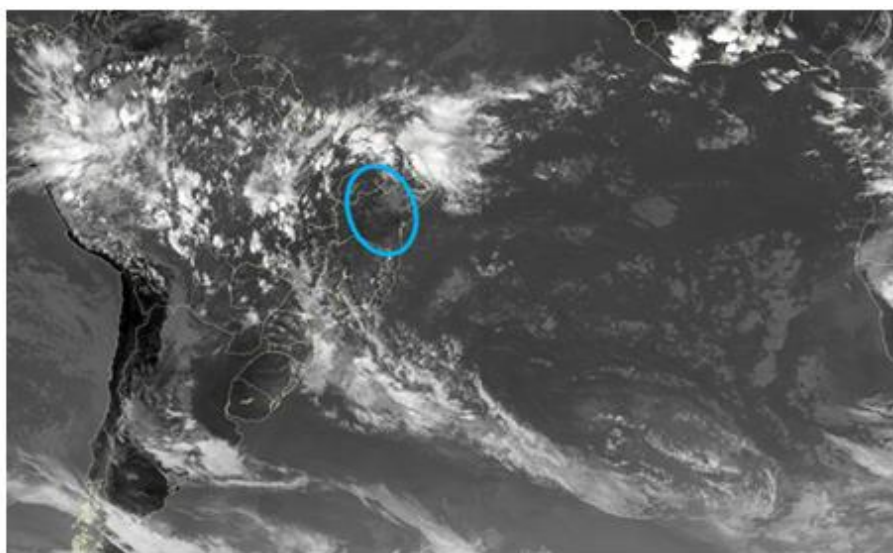


Fonte: www.diariodepernambuco.com.br

5.4.5 VCAN-5

Na Figura 35, observa-se às 18:00 UTC do dia 13 de Março de 2014 a configuração da nebulosidade do VCAN-5. Sobre o Atlântico Sul nota-se a ocorrência da ZCAS, que esteve associada ao VCAN-5. É possível observar o centro do VCAN-5 aproximadamente sobre o estado da Bahia, onde percebe-se “céu claro” devido aos movimentos descendente de ar. É visto nebulosidade convectiva sobre a Região Norte e sobre a costa norte-nordeste do NEB (do Maranhão à Pernambuco). Praticamente em todo o interior do NEB não se percebe presença de nuvens de chuva.

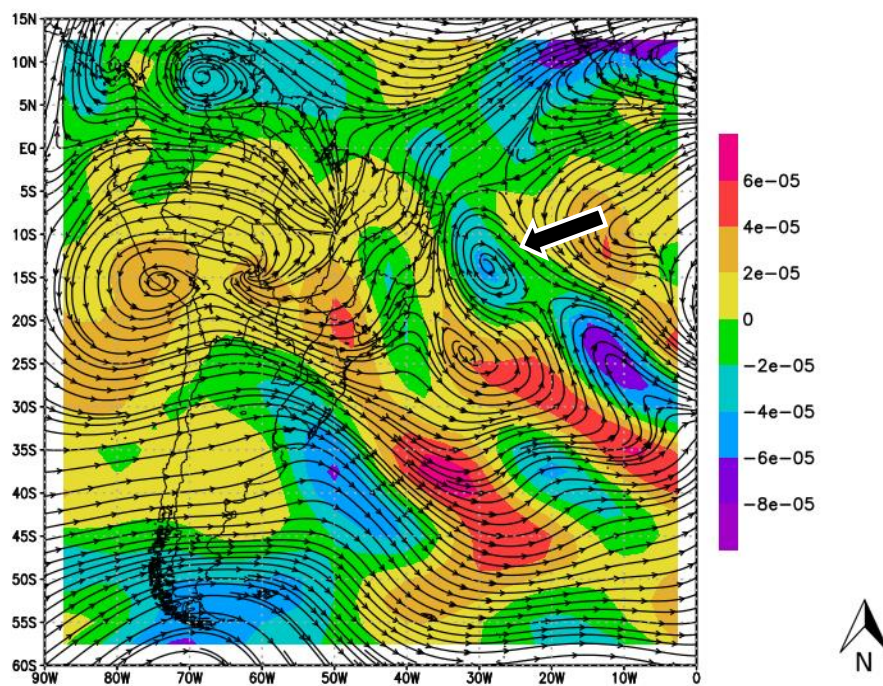
Figura 35 – Imagem composta dos satélites GOES-13 + METEOSAT-10 no canal espectral infravermelho para às 18:00 UTC do dia 13 de Março de 2014. Círculo em azul simboliza a localização aproximada do vórtice ciclônico em 200hPa.



Fonte: Adaptado do CPTEC/INPE, 2016.

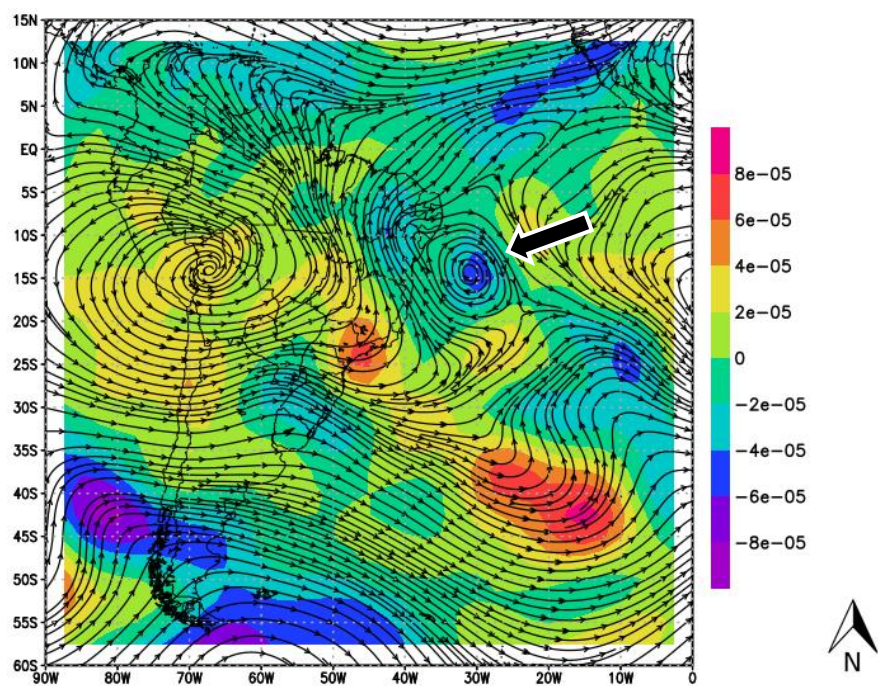
Às 18:00 UTC do dia 11 de Março de 2014 o campo de linhas de corrente em 200hPa (Figura 36) mostra um vórtice ciclônico localizado sobre o Atlântico tropical, aproximadamente entre as latitudes 10°S e 15°S (surgimento do VCAN-5). Na Figura 37, é visto que às 18:00 UTC do dia 12 o VCAN-5 está aproximadamente na mesma posição que no dia anterior. Nota-se em seu núcleo vorticidade relativa entre $-4 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ e $-6 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$, não se percebendo intensificação.

Figura 36 – Linhas de corrente e vorticidade relativa no nível de 200hPa para às 18:00 UTC do dia 11 de Março de 2014.



Fonte: Autor, 2016

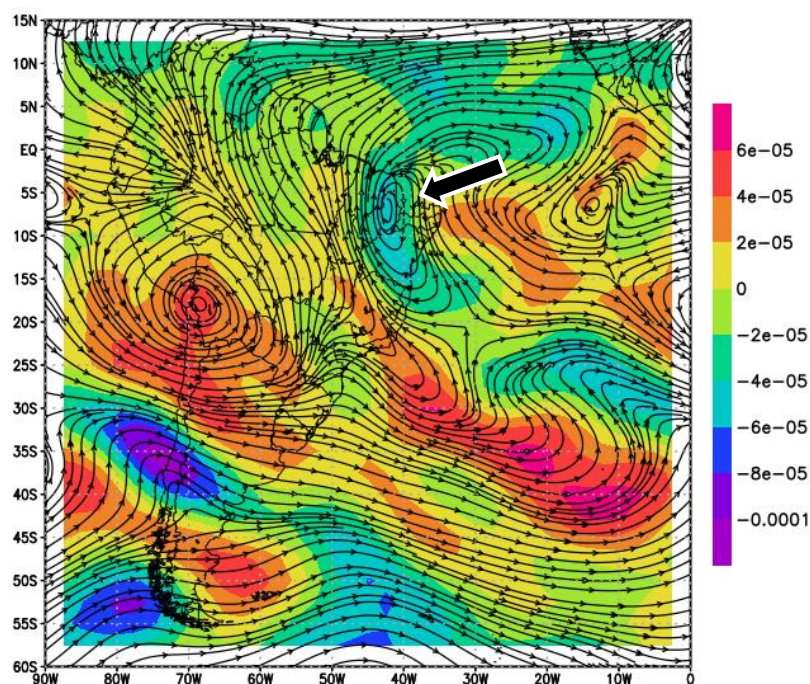
Figura 37 – Linhas de corrente e vorticidade relativa no nível de 200hPa para às 18:00 UTC do dia 12 de Março de 2014.



Fonte: Autor, 2016

O período de vida observado do VCAN-5 foi de apenas 48 horas (das 18:00 UTC do dia 11 às 18:00 do dia 13). De todos os casos estudados, esse VCAN foi o menos duradouro. Na Figura 38 observa-se às 18:00 UTC do dia 13 o núcleo do vórtice sobre o NEB, sendo esse o último momento que o VCAN-5 ainda foi visto configurando. Aproximadamente entre as latitudes 15°S e 20°S e entre as longitudes 65°W e 75°W, a AB é notada com desenvolvimento intenso, com vorticidade relativa entre $4 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ e $6 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$.

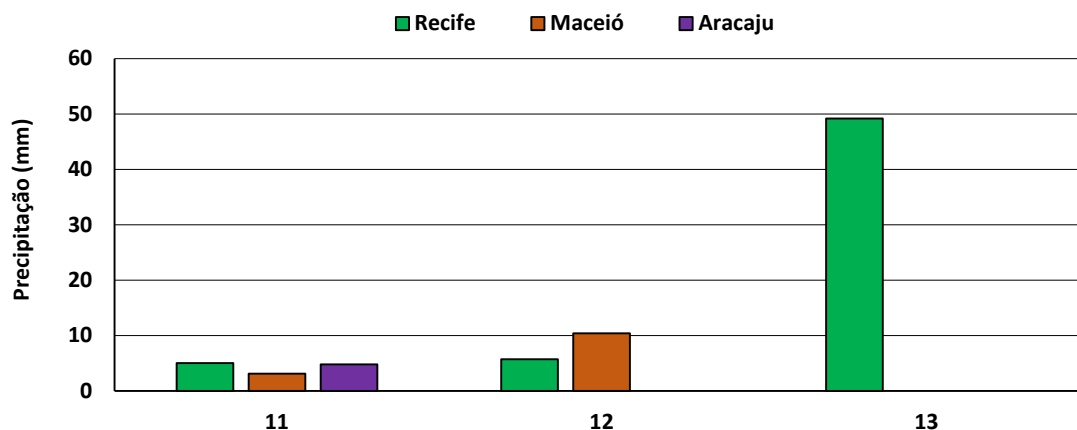
Figura 38 – Linhas de corrente e vorticidade relativa no nível de 200hPa para às 18:00 UTC do dia 13 de Março de 2014.



Fonte: Autor, 2016.

A Figura 39 mostra que o VCAN-5 provocou 1 EPE na cidade de Recife no dia 13 de Março de 2014, igual a 49,2mm. Devido a essa precipitação extrema, jornais de Recife noticiaram diversos transtornos enfrentados pelos moradores. Há relatos de diversos pontos de alagamentos em ruas e avenidas de Recife, parte do asfalto de uma avenida cedeu e uma estação de metrô foi alagada.

Figura 39 – Precipitação diária na área de estudo (Recife, Maceió e Aracaju) durante o período de vida do VCAN-5, de 11 à 13 de Março de 2014.



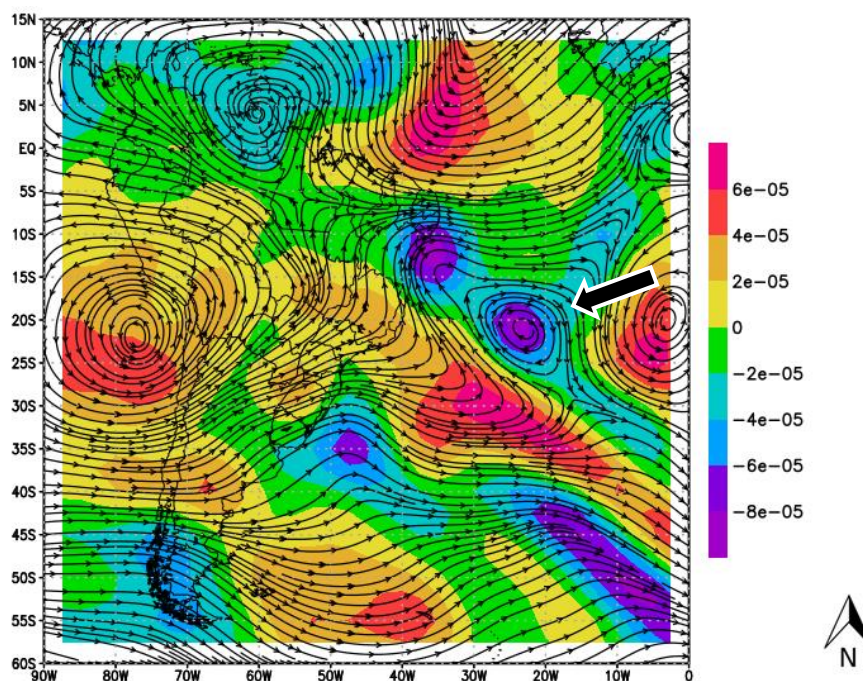
Fonte: Autor, 2016.

5.4.6 VCAN-6

O VCAN-6 foi observado pela primeira vez às 06:00 UTC do dia 16 de Fevereiro de 2015 aproximadamente entre as latitudes 15°S e 25°S e longitudes 20°W e 30°W (Figura 40). Em seu núcleo percebe-se valores intensos de vorticidade relativa, variando entre $6 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ e $10 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$.

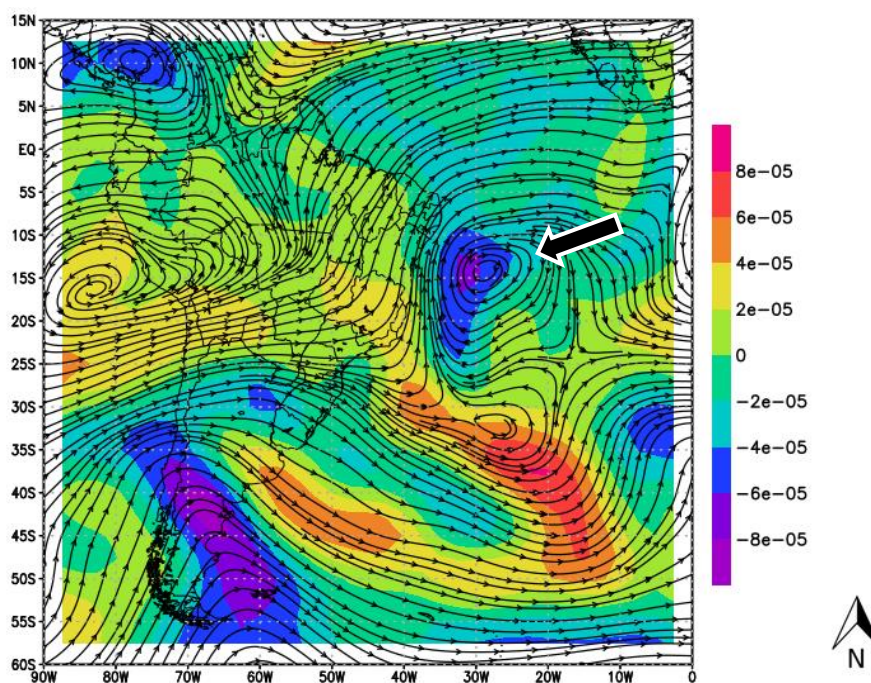
Na Figura 41, nota-se que o VCAN-6 está mais próximo da costa do NEB desde o seu surgimento, localizando-se aproximadamente entre as latitudes 10°S e 20°S e longitudes 25°W e 35°W. Em seu núcleo e na periferia oeste, observam-se vorticidade relativa variando entre $-4 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ e $-8 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$. Na Figura 42, é visto que às 12:00 UTC do dia 25 de Fevereiro de 2015 o VCAN-6 está sobre a Região Norte do Brasil, chegando a uma longitude aproximada de 58°W, um fato incomum, pois a maioria dos VCANs tende a se dissiparem quando penetram no continente. Percebe-se que o vórtice apresenta sinais de dissipação, com o núcleo pouco configurado e vorticidade variando entre $-2 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ e $-6 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$. Às 18:00 UTC do mesmo dia o vórtice não é mais visto, ou seja, sua dissipação ocorreu entre às 12:00 UTC e 18:00 UTC.

Figura 40 – Linhas de correntes e vorticidade relativa no nível de 200hPa para às 06:00 UTC do dia 16 de Fevereiro de 2015.



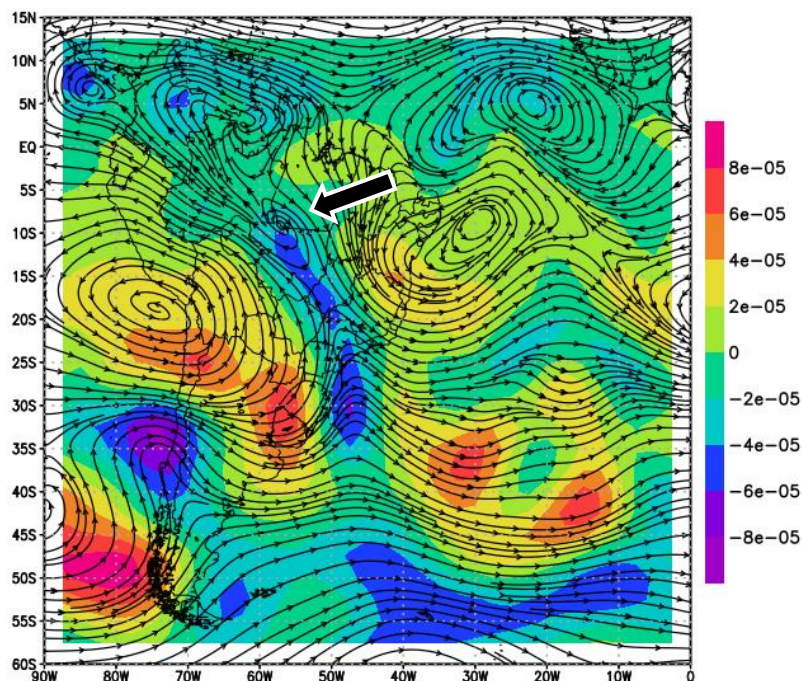
Fonte: Autor, 2016.

Figura 41 – Linhas de correntes e vorticidade relativa no nível de 200hPa para às 12:00 UTC do dia 18 de Fevereiro de 2015.



Fonte: Autor, 2016.

Figura 42 – Linhas de correntes e vorticidade relativa no nível de 200hPa para às 12:00 UTC do dia 25 de Fevereiro de 2015.

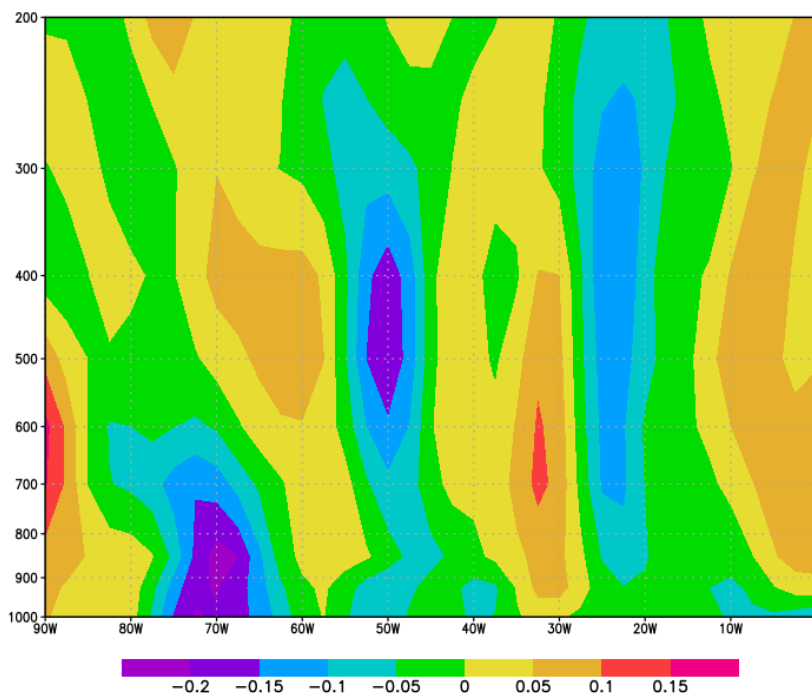


Fonte: Autor, 2016.

A Figura 43 representa o campo de velocidade vertical para às 12:00 UTC do dia 18 de Fevereiro de 2015 e mostra que, aproximadamente entre as Longitudes 27°W e 35°W, existem movimentos descendentes de ar, desde os altos até os baixos níveis da troposfera. Essa região estava sob influência do núcleo do VCAN-6 no dia 18. Percebe-se, tanto na periferia oeste quanto na periferia leste do VCAN-6, movimentos ascendentes de ar desde os baixos até os altos níveis da troposfera, dando o indicativo de ocorrência de nuvens com desenvolvimento vertical, como as cumulonimbus.

Os fortes movimentos ascendentes de ar no baixos níveis da troposfera, aproximadamente entre as Longitudes 65°W e 80°W, estão provavelmente associados com a ocorrência da Alta da Bolívia, que no dia 18 de Fevereiro de 2015 podia ser notada entre as Longitudes 70°W e 90°W e entre as Latitudes 10°S e 20°S.

Figura 43 - Seção vertical longitudinal na latitude de 15° Sul do campo de velocidade vertical (omega) para às 12:00 UTC do dia 18 de Fevereiro de 2015.

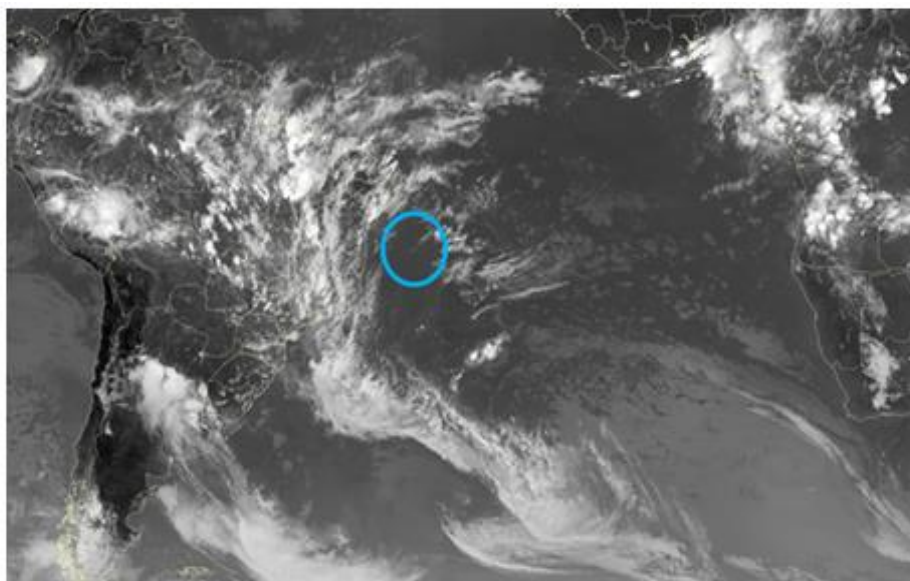


Fonte: Autor, 2016.

Pela imagem de satélite (Figura 44) é possível observar, sobre as regiões Nordeste e Sudeste, nebulosidade associada a ocorrência do VCAN-6 e da ZCAS. Nota-se o núcleo do VCAN-6 sobre o Oceano Atlântico, próximo à costa do estado da Bahia, onde se percebe ausência de nuvens, já na periferia oeste do VCAN, percebe-se que existe atividade convectiva com ocorrência de intensa nebulosidade. A ZCAS está estendendo-se desde o continente brasileiro até o Oceano Atlântico Sul.

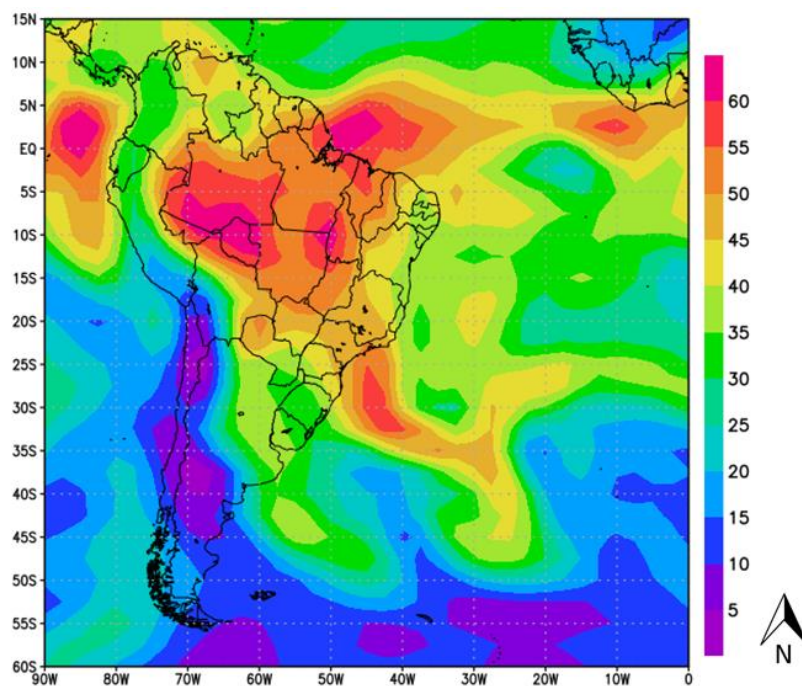
Na Figura 45, o campo de água precipitável mostra valores intensos, entre 50mm e 60mm, associados a ocorrência da ZCAS, aproximadamente entre as latitudes 25°S e 30°S e longitudes 35°W e 50°W, indicando atividade convectiva nessa área. Nas cidades da área de estudo nota-se valores entre 35mm e 40mm. Os valores mais intensos, entre 55mm e 65mm, são visto sobre a região da Amazônia e no Atlântico Equatorial.

Figura 44 - Imagem composta dos satélite GOES-13 + METEOSAT-10 no canal espectral infravermelho para às 18:00 UTC do dia 18 de Fevereiro de 2015. Círculo em azul simboliza a localização aproximada do vórtice ciclônico em 200hPa.



Fonte: Adaptado do CPTEC/INPE, 2016.

Figura 45 – Campo de água precipitável para as 18:00 UTC do dia 18 de Fevereiro de 2015.

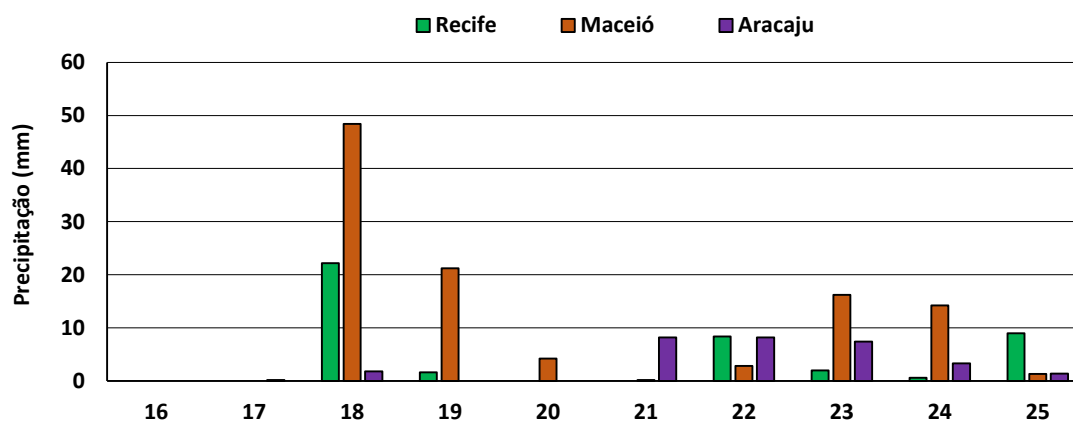


Fonte: Autor, 2016.

Na Figura 46 pode ser observado que o VCAN-6 provocou 1 EPE na cidade de Maceió, no dia 18 de Fevereiro de 2015, igual a 48,4mm. Nesse mesmo dia registrou uma precipitação considerável na cidade de Recife, igual a 22,2mm. A precipitação média (1986-2015) para Maceió durante o mês de Fevereiro é 71,1mm. Apenas durante o período de vida do VCAN-6, de 16 à 25 de Fevereiro de 2015, registrou-se o acumulado de 108,5mm, 34,5% acima da média.

Uma reportagem do site de notícias *www.Tribunahoje.com*, do dia 18 de fevereiro de 2015, relata que vários pontos de alagamentos foram registrados nos bairros do Dique-Estrada, Bebedouro, Vergel do Lago, Farol e trechos da orla marítima. Também houve a ocorrência de 3 escorregamentos de terra, de pequena proporção, sem registros de vítimas.

Figura 46 – Precipitação diária na área de estudo (Recife, Maceió e Aracaju) durante o período de vida do VCAN-6, de 16 à 25 de Fevereiro de 2015.



Fonte: autor, 2015.

6. CONCLUSÕES

A avaliação quantitativa da precipitação mostrou que a ocorrência dos eventos de precipitações extremas estão associados com a precipitação mensal, sendo mais frequentes durante a quadra chuvosa, que nas três cidades Recife, Maceió e Aracaju ocorre durante os meses de Abril à Julho.

Os casos de VCANs estudados, constatou-se que, esses, foram responsáveis por 52,2% de todos os eventos de precipitação extrema que ocorreram nas cidades de Recife, Maceió e Aracaju durante a temporada Novembro/Março entre 2011 à 2015.

Os VCANs 1, 4 e 6 se formaram por um dos mecanismos propostos por Paixão e Gandu (2000), denominado de Formação Africana I. Este VCANs mostraram uma tendência de serem mais duradouros, permanecendo ativos entre 9 à 16 dias. Os VCANs 2 e 3 se formaram pelo mecanismo Clássico proposto por Kousky e Gan (1981) e o VCAN 5 formou-se pelo Mecanismo proposto por Ramirez et al. (1999), denominado de Formação Alta.

Os casos de VCANs mais duradouro, variando entre 9 e 16 dias, ocorreram nos meses de Dezembro, Janeiro e Fevereiro e, os menos duradouros, com média de 2 dias, ocorreram nos meses de Novembro e Março.

Constatou-se pelos diversos sites de notícias que as precipitações extremas provocadas pelos VCANs geraram diversos impactos nas cidades de Recife, Maceió e Aracaju, dentre os mais comuns, alagamentos e escorregamentos de terras. Isso mostra que, um sistema de monitoramento e previsão de tempo eficiente, pode diminuir os transtornos e prejuízos, tanto humano quanto material, causados pelas condições de tempo.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTUROS

Sugere-se que, quando se pretender avaliar dados de precipitação, tentar utilizar mais de uma estação por cidade, visando caracterizar de uma melhor forma a distribuição espacial. Não foi possível utilizar mais de uma estação neste trabalho devido as dificuldades em adquirir dados diários recentes.

Tentar identificar quais os mecanismos que levam alguns VCANs a se dissiparem sobre o Oceano Atlântico, visto que, sobre o oceano não há a quebra de energia cinética que levam a dissipação, ocorrendo principalmente sobre o continente.

Na literatura, a quase totalidade dos trabalhos relacionados à VCANs são estudos de casos, existindo uma lacuna de estudos sobre a climatologia dos VCANs. Então, sugere-se fazer um estudo sobre a climatologia desse sistema sinótico, analisando-se um conjunto de dados, de no mínimo, 30 anos, para tentar explicar a real contribuição nos volumes de precipitação nas sub-regiões do NEB, quais os mecanismos de formação mais frequentes e os tipos de deslocamentos mais comum (zonal ou meridional).

REFERÊNCIAS

- ALVES, J. M. B., FERREIRA, N. S., REPELLI, C. A. **Um estudo diagnóstico das características atmosféricas associadas à atuação de um vórtice ciclônico de altos níveis sobre Atlântico Tropical Sul.** Revista Brasileira de Meteorologia, v.11, n. 1/2, p. 44- 58, 1996.
- AMARAL, C; GUTJAHR, M. R. **Desastres Naturais.** São Paulo: IG-SMA, 100p. 2011.
- ARAGAO, J. O. R. **Um estudo da estrutura das perturbações sinóticas do Nordeste do Brasil.** 219 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. (INPE-789-TPT/017). 1975.
- ARAÚJO, R. S., DA SILVA. S. C., GUIMARÃES, R. B. **Observatório de Geografia (território brasileiro) 1ª edição/ editora Moderna.** 2009
- BARROS, V. R., GRIMM, E. M, DOYLE, E. M. E. **Relationship between temperature and circulation in southeastern South american and its influence from el niño and la niña events.** Journal of the meteorological society of Japan, 80, 21-32. 2002.
- BATISTA, M. L. **Precipitação máxima diária na Região Sudeste do Brasil: Distribuição de probabilidade e análise espacial.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Lavras, 2013.
- BDMEP** – Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/>. Acesso em Outubro de 2015.
- BJERKNES, J. **On the structure of moving cyclones.** Geofysiske Publikationer, v.1, n.2, p.1-8, 1919.
- CAMPOS, L. E. P. **Influência na sucção na estabilidade de taludes naturais em solos residuais.** Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ, 173p. 1984.
- CARVALHO, C. S.; GALVÃO, T. **Prevenção de riscos de deslizamentos em encostas: guia para elaboração de políticas municipais.** Brasília, 111 p. 2. 2006.

CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. **Extreme Precipitation Events in southeastern South America and large-scale convective patterns in the South Atlantic convergence zone.** *Journal of Climate*, v.15, p.2377–2394. 2002.

CAVALCANTI, I.F.A. et al. **Identificação de sistemas frontais em uma simulação de 10 anos com o modelo de Circulação Geral da Atmosfera CPTEC/COLA na Região Sul e Sudeste do Brasil.** Cachoeira Paulista: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001.

CPTEC-INPE - Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos. Disponível em: <<http://tempo.cptec.inpe.br/>>. Acesso em setembro de 2015.

CHAN, C. S. **Análise de distúrbios ondulatórios de leste sobre o Oceano Atlântico Tropical Sul.** São José dos Campos, Dissertação (Mestrado), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 104 pp. 1990.

CHANGNON AS. 1996. **The Great Flood of 1993: Causes, Impacts, and Responses.** Westview Press: Boulder; 321pp.1996.

Diário de Pernambuco – Jornal On-line. **Chuvas Fortes em Recife.** Disponível em: www.diariodepernambuco.com.br. Acesso em Fevereiro de 2016.

DUNN, G.E. **Cyclogenesis in the tropical Atlantic.** *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 21, n.6, p. 215–229, 1940.

FRANK, N.L. **On the energetics of the cold lows.** In: **Symposium on Tropical Meteorology.** Proceedings... Boston: American Meteorological Society, 1970.

FEDOROVA, N. **Meteorologia sinótica,** Pelotas: UFPEL, v.1. 1999.

FERNANDES, N. F. e AMARAL, C. P. **Movimentos de Massa: Uma abordagem Geológico-geomorfológica.** In: GUERRA, A. J. T. e CUNHA, S. B., **Geomorfologia e Meio Ambiente.** Ed. Bertrand, Rio de Janeiro - RJ, p. 123 – 194. 1996.

FERREIRA, A. G; MELLO, N. G. S. **Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região nordeste do brasil e a influência dos oceanos pacífico e atlântico no clima da região.** *Revista Brasileira de Climatologia*, Vol. 1, 2004.

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.

GAN, M. A., **Um estudo observacional das baixas frias da alta troposfera, nas latitudes subtropicais do Atlântico Sul e leste do Brasil**. Dissertação de Mestrado em Meteorologia: INPE, 1983.

GEORGE, J. J., **Weather Forecasting for Aeronautics**. Academic Press, 673 pp. 1960.

GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. da. (org) **Impactos Ambientais Urbanos no Brasil**. 2 ed., Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 416p. 2004

GUIMARÃES, R. F. **Utilização de um modelo de previsão de áreas susceptíveis a escorregamentos rasos com controle topográfico: Adequação e calibração em duas bacias de drenagem**. Tese de Doutorado, UFRJ, Rio de Janeiro, 150p. 2000.

GUTMAN, G. J.; SCHWERDTFEGER, W. **The role of latent and sensible heat for the development of a high pressure system over the subtropical Andes, in Summer**, Jg. Heft,18(3), Mai., 1965.

G1 – Portal de Notícias da Globo. Disponível em: <http://g1.globo.com>. Acesso em Fevereiro de 2016.

HOLTON, J. R. **Movimentos de escala sinótica I: análise quase-geostrófica**. In: **Introdução a meteorologia dinâmica**. Edição traduzida, P. 141-181. 1997

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/>. Acesso em: Outubro de 2015.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990**. Publicação em CD. 1991.

KALNAY, E., KANAMITSU, M., KISTLER, R., COLLINS, W. The nmc\ncar 40-year reanalysis Project. Bulletin of the american meteorological society, 77, 437-471. 1996.

KISTLER, R. COLLINS, W. SAHA, S. WHITE, G. WOOLLEN, J. **The NCEP–NCAR 50–Year Reanalysis: Monthly Means CD–ROM and Documentation**. 2001. Disponível em: [http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/15200477\(2001\)082%3C0247%3ATNNYRM%3E2.3.CO%3B2](http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/15200477(2001)082%3C0247%3ATNNYRM%3E2.3.CO%3B2). Acesso em Junho de 2015.

KOBIYAMA, M. MENDONÇA, M. MORENO, D. A. MARCELINO, I. P. V. O. MARCELINO, E. V. GONÇALVES, E. F. BRAZETTI, L. L. P. GOERL, R. F. MOLLERI, G. S. F. RUDORFF, F. M. **Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos**. Curitiba: ed. Organic Trading, 109p, 2006.

KODOMA, Y. M. Large-scale common features of sub-tropical precipitation zones (the baiu frontal zone, the spcz, and the sacz). Part II: conditions of the circulations for generating the stczs. *J. Meteor. Soc. Japan*, 71, 581-610. 1993.

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

KOUSKY, V. E., GAN. M.A, **Upper tropospheric cyclonic vortices in the tropical South Atlantic**. *Tellus*, 33, 538-551. 1981.

KOUSKY, V. E., KAYANO, E. M. T. **Principal models of outgoing longwave radiation and 250-mb circulation for the South american sector**. *J. Climate*, 7, 1131-1143, 1994.

LEMOS, C.F.; CALBETE, N. O. **Sistemas frontais que atuaram no litoral de 1987-1995**. *Climanálise*, Edição comemorativa 10 anos, 1996. (INPE-10717PRE/6178). Disponível em: <<http://tucupi.cptec.inpe.br/products/climanalise/cliesp10a/14.html>>. Acesso em: Setembro de 2015.

LOURENÇO, M. C. M. et al., **Estudo de um caso de Vórtice Ciclônico em Altos Níveis que atuou no sul da América do Sul: Parte A – Aspectos Sinódicos**. In: *Anais do IX Congresso Brasileiro de Meteorologia*, V1, Campos do Jordão, p. 470-473. 1996.

MARCELINO, E. V. **Desastres naturais e geotecnologias: conceitos básicos**. Santa Maria, RS, Brasil: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais(INPE) e Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), 38 p. 1, 2, 3. 2008.

MELO, A. B. C. de. **Previsibilidade da precipitação na Região Semi-Árida do Nordeste do Brasil, durante a estação chuvosa, em função do comportamento diário das chuvas na pré-estação. Dissertação de Mestrado em Meteorologia**. Departamento de Ciências Atmosféricas (DCA). Universidade Federal da Paraíba – UFPB. Campina Grande-PB. 100 p. 1997.

MILLER, R. C., **Notes on analysis and severe storm forecasting procedures of the Air Force Global Weather Central**. AFGWC Tech. Rep. 200 (Rev.), Air Weather Service, U.S. Air Force, 190 pp. [Available from AWSTL, 859 Buchanan St., Scott AFB, IL 62225]. 1972.

MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S. O. **Uma Revisão da Dinâmica das Chuvas no Nordeste Brasileiro**. Revista Brasileira de Meteorologia 17(1):1-10, ISSN0102-7786, 2002.

NOBRE, P. et al., **Modulações da ZCAS pelas temperaturas da superfície do mar no Oceano Atlântico Sudoeste**. In: Anais do XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Foz do Iguaçu-PR, p.3520-3527. 2002.

OLIVEIRA, A. S. **Interações entre sistemas frontais na América do Sul e convecção na Amazônia**. 134p. (INPE-4008-TDL/239). Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1986.

OLIVEIRA, L.L.; Vianello, R.L.; Ferreira, N.J. **Meteorologia Fundamental**. Erichim, RS: EDIFAPES, 432 p. 2001.

OHIO STATES UNIVERSITY – **Intrepretação dos valores de CAPE e Índice K**. Disponível em: twister.sbs.ohio-state.edu. Acesso em Novembro de 2015.

PAIXÃO, E. B., GANDU, A. W. **Caracterização do Vórtice ciclônico de Ar Superior no Nordeste brasileiro**. In: Anais do XI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Rio de Janeiro, p. 75-88. 2000.

PAIXÃO, E. B., **Caracterização do Vórtice Ciclônico de Ar Superior no Nordeste Brasileiro**. Dissertação de Mestrado, DCA/IAG/USP. 104 pp. 1999.

PALMER, C.E., **On high-level cyclones originating in the tropics**. Transactions of American Geophysics Union, 32 (5), 683-695. 1951.

PETTERSEN, S. **Weather analysis and forecasting**. New York: McGraw-Hill, v.1, 498p. 1956.

PINKAYAN, S. **Conditional probabilities of occurrence of Wet and Dry Years Over a Large Continental Area. Colorado**. State University, Boulder-Co, (Hidrology Papers, 12). 1966.

QUADRO, M.F.L. **Estudo de episódios de zonas de convergência do Atlântico Sul (ZCAS) sobre a América do Sul.** 1994. 97p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1994.

RAMÍREZ, M. C. V., KAYANO, M.T., FERREIRA, N. J. **Statistical analysis of upper tropospheric vórtices in the vicinity of Northeast Brazil during the 1980-1989 period.** Atmosfera, v. 12, p. 75-88. 1999.

RAMÍREZ, M. C. V., **Padrões dos Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis no Nordeste do Brasil.** Dissertação de mestrado em Meteorologia, Instituto de Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 1999.

REDIVO, A. L., RAMOS, V. M. e GUIMARÃES, R. F. **Aplicação do modelo SHALSTAB para determinação de áreas susceptíveis a escorregamentos rasos na região do subúrbio ferroviário – Salvador (BA).** In: REGEO, Porto Alegre - RS. CdRom. 2003.

SANTOS, C.A.C. **Estimativas e Tendências de Índices de Detecção de Mudanças Climáticas com Base na Precipitação Diária no Rio Grande do Norte e na Paraíba.** Campina Grande: UFCG. 115p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Universidade Federal de Campina Grande. 2007.

SANTOS, A. H. M. **Eventos Extremos de Chuva em Salvador, Bahia: Condições Atmosféricas e Impactos Ambientais.** 2007. 65 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia)-Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.

SANTOS, C. A. C.; NEALE, C. M. U.; RAO, T. V. R.; SILVA, B. B. **Trends in indices for extremes in daily temperature and precipitation over Utah, USA.** International Journal of Climatology. v 31, p. 1813 – 1822, 2011.

SANTOS, A. P. P. **Precipitação na cidade de Salvador: classificação em quantis e análise de um evento climático extremo.** Dissertação de Mestrado. Campina Grande-PB, 2013.

SATYAMURY, P., DIAS, P. L. S. **Topics: South américa.** 1995.

- SILVA, V. P. R., LIMA, W. F. A. **Estudo dos Vórtices ciclônicos de Ar Superior sobre o nordeste do Brasil**. In: Anais do XII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, Fortaleza-CE, 2001.
- SOUSA, C. A. et al., **Atuação de Vórtice Ciclone de Altos Níveis nos meses de verão de 2000-2001, Parte A**. In: Anais do XII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, Fortaleza – CE, p. 313-314. 2001.
- TEIXEIRA, C. Z. **Um Estudo de viabilidade para fundações rasas de construções de pequeno porte na região de Belo Horizonte usando ferramentas SIG**. VI Curso de Especialização em Geoprocessamento, Departamento de Cartografia, IGEO, UFMG, Belo Horizonte - MG, 72p. 2002.
- TEIXEIRA, M. S., SATYAMURTY, P. **Dynamical and synoptic characteristics of heavy rainfall episodes in southern Brazil**, *Monthly Weather Review*, v. 135, p. 598-617, 2011.
- TUCCI, C. E. M. **Gestão de águas pluviais urbanas. Brasília: Ministério das Cidades**, 194p. (Saneamento para Todos; 4º volume). 2006.
- TUCCI, C. E. M. **Impactos da variabilidade climática e dos usos do solo nos recursos hídricos**. Brasília: ANA, 150 p. Relatório técnico, 2001.
- UVO, C. B. **A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e sua relação com a precipitação na Região Norte do Nordeste Brasileiro**. Dissertação de Mestrado em Meteorologia, INPE. São José dos Campos, SP. 1989.
- VIANELLO, R. L. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa: UFV, 449p. 1991
- VIRJI, H. **A preliminar study of summertime tropospheric circulation patterns over South American estimated cloud winds**. *Montley Weather Review*, March 1981, p.
- XAVIER, T. de Ma. B.S. **Tempo de Chuva – Estudos Climáticos e de Previsão para o Ceará e Nordeste Setentrional**, ABC Editora, Fortaleza-Ceará, 478 pp. 2001.
- YAMAZAKI, Y.; RAO, V. B. **Tropical Cloudiness over the South Atlantic Ocean**. *Journal of the Meteorology Society of Japan*, v. 55, n. 2, p. 204-207. 1977.