



# Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: [www.ufpe.br/rbgfe](http://www.ufpe.br/rbgfe)



## Análise termodinâmica e frequência de trovoadas entre os anos de 2008 a 2012 em Maceió, Alagoas

Edwans Silva Cordeiro<sup>1</sup>; Nídia Maria da Silva<sup>2</sup>; Vladimir Levit<sup>3</sup>; Natalia Fedorova<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Mestranda em Meteorologia, Universidade Federal de Alagoas - UFAL, Maceió, Alagoas, Brasil, [divascordeiro@gmail.com](mailto:divascordeiro@gmail.com). <sup>2</sup>Graduanda em Meteorologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, Alagoas, Brasil, [nidiamaria.s@gmail.com](mailto:nidiamaria.s@gmail.com). <sup>3</sup>Prof. Doutor efetivo em Física, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, Alagoas, Brasil, [vladimirle@gmail.com](mailto:vladimirle@gmail.com). <sup>4</sup>Prof. Doutora efetiva em Meteorologia Sinótica, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, Alagoas, Brasil, [nataliabras@gmail.com](mailto:nataliabras@gmail.com).

Artigo recebido em 09/07/2013 e aceito em 27/09/2013

### RESUMO

A previsão do fenômeno adverso trovoadas tem extrema importância para segurança de toda população em Alagoas e especialmente para transporte aéreo. A elaboração do método de previsão de trovoadas pelos métodos termodinâmicos é o objetivo principal do projeto. Foram utilizados os seguintes dados de: 1) Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA); 2) satélite TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission); 3) Reanálise do National Centers for Environmental Prediction (NCEP); e 4) modelo HYSPLIT. O estudo termodinâmico da estrutura da troposfera foi feita para todos os 70 casos observados com trovoadas no período de 2008-2012. A comparação da frequência de trovoadas nestes 5 anos com os 10 anos anteriores (estudados antes), mostraram aumento da frequência entre dezembro e maio nos últimos anos de 6 eventos em 1998 a 21 eventos em 2008. O estudo termodinâmico foi baseado na análise dos perfis verticais previstos de temperatura e umidade. Esta previsão foi feita pelas trajetórias das parcelas de ar do modelo HYSPLIT nos 10 níveis padrões. A avaliação da qualidade dos perfis foi feita com auxílio dos índices de instabilidade. Os índices LI e CAPE+ mostraram os resultados satisfatórios e os índices K e TT mostraram resultados não satisfatórios na análise de ocorrência de trovoadas.

Palavras-chave: Palavra-Chave: Fenômeno Adverso, HYSPLIT e Instabilidade.

## Thermodynamic analysis and frequency of thunderstorms in the years 2008 to 2012 in Maceió, Alagoas

### ABSTRACT

The prediction of adverse phenomenon thunderstorm has extreme importance for the security of the entire population in Alagoas and especially for air transport. The development of prediction method of Thunderstorm by thermodynamic methods is the main objective of the project. The following data were used: 1) the conventional meteorological data from the Department of Air Space Control (DECEA); 2) lightning data from satellite TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission); 3) reanalysis data from the National Centers for Environmental Prediction (NCEP); and; 4) HYSPLIT model. The thermodynamic study of the structure of the troposphere was done for all 70 cases with thunderstorm observed in the period of 2008-2012. The comparison of the thunderstorm frequency in these 5 years with the 10 previous years (studied before), showed increase of the frequency between December and May in the last years from 6 events in 1998 to 21 events in 2008. The thermodynamic study was based on analysis of vertical profiles of temperature and humidity. This prediction was made by the trajectories of air parcels in the HYSPLIT model in 10 levels. The evaluation of the quality of the predicted profiles was done with the instability indices. The indices LI and CAPE+ showed satisfactory results and the indices K and TT showed not satisfactory results in the analysis of incident of thunderstorms.

Key-Words: Adverse Phenomenon, HYSPLIT and Instability.

\* E-mail para correspondência:  
[divascordeiro@gmail.com](mailto:divascordeiro@gmail.com) (Cordeiro, E. S.).

## Introdução

Trovoada constitui em um conjunto de fenômenos intensos associados à Cumulonimbus, são eles que denunciam a presença da tempestade, ou seja, quando essa alcançou sua fase madura e, a partir desse ponto, todos os fenômenos associados à sua existência poderão ocorrer como raios, relâmpagos, rajadas de vento, inundações, granizo e possivelmente tornado.

Eventos de vendavais, granizos e tornados, ainda que relativamente raros em comparação com outros sistemas meteorológicos (como chuvas frontais, por exemplo), representam ameaça potencial para atividades importantes como, por exemplo, defesa civil, aviação, agricultura e transmissão e distribuição de energia elétrica. Assim, o fato de serem eventos relativamente raros não implica em darmos menos atenção ao estudo destes sistemas e ao treinamento de pessoal operacional visando à previsão dos mesmos. Identificar, com antecedência de várias horas, condições favoráveis à formação de sistemas convectivos severos é essencial para a veiculação adequada de alertas e antecipar a adoção de estratégias que eliminem ou minimizem o impacto negativo destes fenômenos meteorológicos.

A análise dos processos termodinâmicos nas nuvens de desenvolvimento vertical é um dos métodos principais de estudo das trovoadas. Todavia, a carência dos estudos dos processos termodinâmicos no Nordeste Brasileiro

(NEB) não permite concluir sobre a possibilidade da formação das trovoadas.

Sobre os fenômenos adversos associados com trovoadas há carência de trabalhos e a ausência destes para o NEB mostram a necessidade de desenvolvimento de estudos nesta área. Os objetivos deste trabalho são: (1) estudar a frequência dos casos de trovoadas no período de 2008 a 2012, para o estado de Alagoas; (2) avaliar a eficácia dos índices de instabilidade (K, TT, LI e CAPE+) na previsão de trovoadas para a região, através dos perfis verticais previstos, elaborados com uso das trajetórias das parcelas de ar do modelo HYSPLIT.

## Material e Métodos

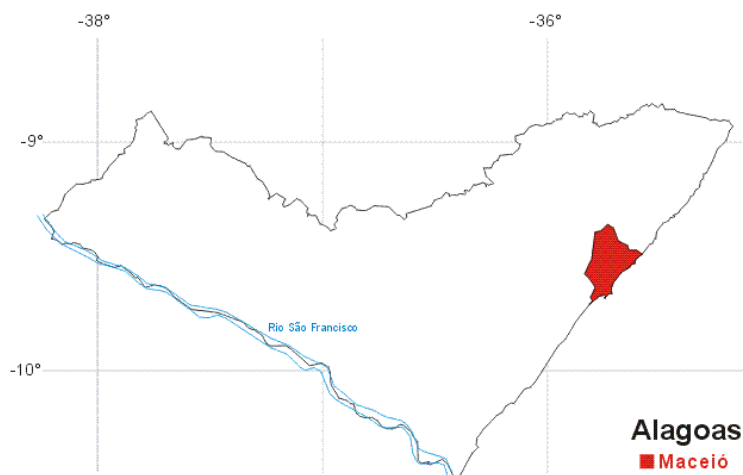
### Caracterização da área de estudo

A área estudada deste fenômeno adverso foi sobre o Estado de Alagoas, onde se situa no centro-oeste do NEB entre as Latitudes 8°12'S e 10°12'S e Longitudes 35°09'W e 38°13'W (Figura 1). O Estado possui uma área equivalente a 0,32% do Território Nacional, e 1,8%, da Região do NEB, apresenta uma extensão territorial de 27.767,661 km<sup>2</sup>, uma população de 3 milhões de habitantes distribuídos entre os municípios que compõem o Estado (IBGE, 2009).

O estado de Alagoas possui um clima tropical, com temperatura média anual de 24 °C e índices pluviométricos mensais no período chuvoso de 113,6 mm (abril à julho) e período seco de 14,3 mm (setembro à dezembro), situado no NEB (FIGUEIREDO, 2002).

Maceió por sua vez, é uma cidade litorânea com clima trópico-úmido, localizada na latitude 9°40' ao Sul do equador e longitude 35°42' a Oeste do meridiano de Greenwich. A temperatura média anual é de

24,8 °C e como uma típica cidade do trópico úmido tem uma baixa amplitude térmica, tanto diária quanto anual. A temperatura média mensal mais alta é de 26,3 °C e a mais baixa, 23,5 °C.



**Figura 1.** Localização do estado de Alagoas e município de Maceió em vermelho. Fonte: (www.ambientebrasil.com.br/.../hal.html).

Levantamento dos eventos com trovoadas.

O levantamento do número de casos com trovoadas e suas respectivas datas com ocorrência das mesmas, foi realizado através do banco de dados dos fenômenos adversos no Aeroporto Internacional Zumbi dos Palmares, localizado na cidade de Maceió, Alagoas. Esses dados foram obtidos do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA). Os dados de trovoadas registrados têm alcance máximo de 20 km de raio do Aeroporto, que está localizado em 09°31'S de latitude e 34°55'W de longitude. Neste trabalho foram feitas análises dos casos com trovoadas para os cinco últimos anos em estudo (2008 à 2012).

Do mesmo modo que os dados convencionais, os dados do satélite TRMM

(Tropical Rainfall Measuring Mission) registraram e analisaram todos os casos para os anos de 2008, 2009, 2010, 2011 e 2012. O sistema TRMM oferece algumas das mais valiosas imagens para acompanhamento, previsão e análise de precipitação. Os instrumentos de bordo monitoram nuvens, precipitações, fluxo de calor, raios e outros aspectos do ciclo da água (PASSOW, 2010).

O satélite TRMM tem 5 sensores a bordo, os quais são: 1) Precipitation Radar (PR), 2) TRMM Microwave Imager (TMI), 3) Visible Infrared Scanner (VIRS), 4) Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES), 5) Lightning Imaging Sensor (LIS).

O sensor LIS a bordo do satélite TRMM é um instrumento usado para detectar relâmpagos nas regiões tropicais do globo. O

satélite TRMM descreve uma órbita tropical, inclinação com relação ao equador a 350 km de altitude. Com isso, o LIS pode observar a atividade de relâmpagos entre as latitudes de 35°S a 35°N.

Nos trabalhos anteriores elaborados por Brito (2008 a, b e c), foi feito um levantamento do número de casos com

trovoadas utilizando (1) dados do Aeroporto Zumbi dos Palmares e (2) pelas imagens do satélite TRMM. Os estudos elaborados neste trabalho são frutos da continuidade dos resultados do trabalho estudado por Brito (2008 a, b e c), mostrados na Tabela 1, onde o mesmo mostrou a frequência do fenômeno adverso entre os anos de 1998 a 2007.

**Tabela 1.** Frequência de trovoadas pelos dados do satélite TRMM, que são os valores mostrados sem parênteses, e pelos dados do Aeroporto Zumbi dos Palmares, valores entre parênteses, em um período de 10 anos (1998-2007). Fonte: Brito 2008a, b e c.

Ano/Mês	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
<b>JAN</b>	3(0)	1(0)	5(1)	0(0)	4(0)	4(1)	4(1)	4(0)	0(0)	1(0)
<b>FEV</b>	0(0)	1(0)	3(0)	0(0)	4(1)	5(0)	1(1)	2(0)	1(1)	8(1)
<b>MAR</b>	2(0)	4(0)	0(0)	2(2)	2(1)	2(2)	2(0)	5(1)	5(1)	3(0)
<b>ABR</b>	1(0)	0(0)	0(2)	0(0)	2(0)	2(0)	0(0)	1(0)	5(0)	3(2)
<b>MAI</b>	0(0)	2(0)	2(0)	0(0)	0(0)	0(0)	1(0)	1(0)	2(0)	1(0)
<b>JUN</b>	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	1(0)	0(0)	0(0)
<b>JUL</b>	0(0)	0(0)	0(0)	1(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)
<b>AGO</b>	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	2(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)
<b>SET</b>	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)
<b>OUT</b>	0(0)	0(0)	0(0)	2(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)
<b>NOV</b>	0(0)	1(0)	1(0)	0(0)	2(0)	0(0)	1(0)	0(0)	0(0)	0(0)
<b>DEZ</b>	0(0)	4(1)	0(0)	7(0)	2(0)	1(0)	1(0)	3(2)	2(0)	1(0)
<b>Soma</b>	6	13	13	12	16	17	12	17	16	19
<b>Média</b>	0,5	1,1	1,1	1,0	1,3	1,4	1,0	1,4	1,3	1,6

Dentre esses dados meteorológicos observacionais e em conjunto com os resultados apontados por Brito (2008a, b e c), foram registrados e analisados casos referentes às trovoadas para o estado de Alagoas, entre os anos de 2008 à 2012, onde a partir destes, serão discutidos neste trabalho.

### 2.3 Utilização de dados e modelos.

Os dados de Reanálise do National Centers for Environmental Prediction do National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) foram utilizados para construção do campo de análise dos perfis verticais em 10 níveis de pressão onde serão

detalhados mais adiante. Para visualização dos dados, foi utilizado o software Grid Analysis and Display System (GrADS).

O modelo HYSPLIT é um sistema completo para a computação em trajetórias simples da parcela de ar para dispersão e simulações complexas. O desenvolvimento inicial foi resultado de um esforço conjunto entre NOAA e Bureau de Meteorologia da Austrália. Recentes atualizações incluem melhorias fornecidas por um número de contribuintes diferentes. Sem a dispersão de módulos adicionais, Hysplit calcula a advecção de uma partícula única poluente, ou simplesmente a sua trajetória.

O modelo HYSPLIT (modelo on-line), foi utilizado para o cálculo das trajetórias das parcelas de ar, com 12, 24, 36 e 48h de antecedência do fenômeno em estudo. Os dados de entrada utilizados foram os dados do NCEP/NCAR mencionado no sub tópico anterior. A direção da trajetória é a BACKWARD, isto é de onde a trajetória veio. Também foi determinado o ponto final da trajetória, pela latitude e longitude da localidade de Maceió. O ponto final da trajetória também foi determinado no plano vertical, que foi calculado em 10 níveis. As saídas do modelo são gráficos nos planos horizontal (latitude, longitude) e vertical (movimentos verticais) e também disponibilizam os dados a cada hora numericamente em Tabela.

## 2.4 Elaboração dos Perfis Verticais para análise das trovoadas.

A análise termodinâmica da atmosfera, associada à formação dos trovoadas, foi realizada através de perfis verticais simulados. Essa simulação foi feita por falta de dados de radiossondagem no Estado de Alagoas.

Os perfis simulados foram construídos com base nas trajetórias das parcelas de ar para a cidade de Maceió utilizando o modelo HYSPLIT. Essas trajetórias foram calculadas para 10 níveis (950, 900, 850, 800, 700, 600, 500, 450, 400 e 300).

Para a elaboração do Perfil Vertical Simulado (SIM) foram utilizados dados de reanálise do NCEP e analisados para os cinco anos de estudo. Tais perfis foram construídos em um ponto inicial de grade que foi escolhido dentro do estado de Alagoas em 9,6°S de latitude, 36°W de longitude e abaixo de 300 metros de altitude. Os dados utilizados para construção do SIM são componente u e v do vento, umidade e temperatura para Maceió.

Após a construção e análise dos perfis verticais simulados, inicia-se o estudo dos índices de instabilidade (detalhados no tópico 2.5). Estes índices (K, TT, LI e CAPE+) foram escolhidos no intuito de analisar a intensidade da atmosfera para eventos de trovoadas e, concomitantemente, contribuir com resultados satisfatórios para elaboração métodos de previsão das trovoadas.

Análise e descrição dos Índices de Instabilidade.

Para avaliar a capacidade potencial da atmosfera para o desenvolvimento de tempestades, foram avaliados a partir das radiossondagens os seguintes Índices de Instabilidade. Fontes: DUARTE *et al.*(2002) e SRH NOAA (2010).

#### Índice K

Este é um índice utilizado para investigar a possibilidade de formação de tempestades na atmosfera. Apresenta considerações sobre os parâmetros abaixo, de acordo com a metodologia de Whiting: a) Variação vertical da temperatura; b) Conteúdo de umidade da camada mais baixa; c) Extensão vertical da camada úmida; d) Convergência e divergência de massa; e) Vorticidade relativa.

No método de Whiting, a vorticidade relativa foi desprezada pela sua complexidade e porque este autor considerou a convergência suficiente para os propósitos analisados. Assim, Whiting utilizou os três primeiros parâmetros como índice de modificação do potencial de tempestades, através da Equação 1:

$$K = (T_{850} - T_{500}) + Td_{850} - (T_{700} - Td_{700}) \quad (1)$$

Onde:

$(T_{850} - T_{500})$  é a variação vertical da temperatura (T), obtida pela diferença de temperaturas entre os níveis 850 e 500hPa;

$Td_{850}$  é a temperatura do ponto de orvalho (Td) em 850hPa;

$(T_{700} - Td_{700})$  é a depressão de temperatura em 700hPa.

A Tabela 2 apresenta os valores críticos para o Índice K:

**Tabela 2.** Índice K. (Fonte: DUARTE *et al.*, 2002).

Índice "K"	Potencial de Tempestades
0 a 15	0%
15 a 19	20% - pouco favorável a tempestade
20 a 25	35% - tempestades isoladas
26 a 29	50% - tempestades esparsas
30 a 35	85% - numerosas tempestades
> 36	100% - tempestades severas

#### Índice Total-Totals (TT)

Este índice de instabilidade também pode ser utilizado para determinar a possibilidade de ocorrência de tempestades

em uma determinada região, utilizando os dados obtidos de radiossondagens. É obtido pela Equação 2:

$$TOTL = (T_{850} - T_{500}) + (T_{d850} - T_{500}) \quad (2)$$

$T_{d850}$  é temperatura do ponto de orvalho no nível de 850hPa [°C].

Onde:

$T_{850}$  é temperatura do ar no nível de 850hPa [°C];

$T_{500}$  é temperatura do ar no nível de 500hPa [°C];

A Tabela 3 apresenta os valores críticos do Índice Total-Totals:

**Tabela 3.** Índice TT. (Fonte: DUARTE et al., 2002).

Índice Total-Totals	Potencial de Tempestades
< 43	Tempo estável
44	Isolada ou pouca instabilidade
46	Tempestades esparsas
48	Tempestades esparsas, tempestades severas isoladas
50	Tempestades esparsas, poucas tempestades severas
52	Numerosas tempestades esparsas, poucas tempestades severas esparsas
56	Tempestades numerosas

Índice de Levantamento (Lifted Index – LI)

O índice de instabilidade por levantamento é definido por (GALWAY, 1956) pela Equação 3:

$$LI = T_{500} - T_{500}' \quad (3)$$

Onde:

$T_{500}$  é a temperatura do ar ambiente em 500 hPa e;

$T_{500}'$  é a temperatura de uma parcela de ar em 500 hPa (ambas em graus Celsius) após ascender – via curva adiabática seca, e úmida após a saturação – a partir da superfície, com

a temperatura para o horário em que o perfil é obtido.

Valores negativos de LI indicam condições instáveis, por exemplo, a parcela de ar ascendente é flutuante em níveis médios. O índice LI é uma informação importante para analisar o grau de instabilidade atmosférica, especialmente quando combinada com o CAPE (NASCIMENTO, 2005).

A Tabela 4 apresenta os valores críticos do Índice LI:

**Tabela 4.** Índice LI. (Fonte: <http://www.srh.noaa.gov/ffc/html/gloss2.shtml>)

Índice LI	Potencial de ocorrência de atividade convectiva
LI > 2	Sem atividade convectiva significante
0 < LI < 2	Possibilidade de ocorrência de convecção rasa
-2 < LI < 0	Possibilidade de ocorrência de convecção profunda
-4 < LI < -2	Possibilidade de chuvas e trovoadas (porém, pouco severas)
LI < -4	Possibilidade de chuvas torrenciais com trovoadas severas

**CAPE+**

O valor de CAPE, também conhecido como energia de fluatibilidade, corresponde à área entre a curva de temperatura do ambiente (dada pela sondagem) e a curva da adiabática saturada, do Nível de Convecção Espontânea (NCE) até o Nível de Equilíbrio (NE). O NCE é o nível em que a temperatura da parcela torna-se maior que a do ambiente, o que induz movimentos ascendentes espontâneos da parcela. O NE é o nível, perto do topo da troposfera, em que a parcela tem a mesma temperatura que a do ambiente e, portanto, não continua em seu movimento ascendente (representa o nível do topo das nuvens).

Quanto maior o CAPE, maior é a diferença entre a taxa de variação vertical de temperatura do ambiente e da parcela, o que implica em um movimento de ascensão da parcela devido à sua fluatibilidade. O valor do CAPE é utilizado na verificação das condições de instabilidade da atmosfera provocada por processos convectivos.

O valor do CAPE pode ser calculado a partir da Equação 4:

$$CAPE = \int_{z=NCE}^{z=NE} g \frac{\Delta\theta_e}{\theta_{es}} dz \quad (4)$$

Onde:

NE é nível de equilíbrio (térmico) [m];

NCE é nível de convecção espontânea [m];

g é aceleração da gravidade [m/s<sup>2</sup>];

$\Delta\theta_e$  é diferença entre a temperatura potencial equivalente da parcela em superfície e a temperatura potencial equivalente saturada do ambiente, em cada nível [°C], dado pela Equação 5:

$$\Delta\theta_e = \theta_{ep} - \theta_{es} \quad (5)$$

Onde:

$\theta_{ep}$  é a temperatura potencial equivalente da parcela em superfície [°C];

$\theta_{es}$  é a temperatura potencial equivalente saturada do ambiente, dada pela sondagem [°C].



A Tabela 5 apresenta os valores limites de CAPE, indicando o potencial para o desenvolvimento de tempestades.

**Tabela 5.** Índice CAPE. (Fonte: DUARTE *et al.*, 2002).

CAPE	Potencial de Convecção
<300	Baixa ou nenhuma
300-1000	Fraca
1000-2000	Moderada
2000-3000	Forte

Embora esses índices de instabilidade tenham sido originalmente concebidos para as latitudes médias do Hemisfério Norte, eles podem ser úteis para a previsão de sistemas convectivos no Brasil, em particular para a região sul do país. Para as regiões tropicais do país existe a necessidade de adequá-los, utilizando estes índices como base conceitual. (NASCIMENTO, 2005).

## Resultados e Discussão

Estudo da frequência das trovoadas.

A análise da frequência das trovoadas foi feita utilizando os dados do Aeroporto Zumbi dos Palmares e dados do satélite TRMM para o período de cinco anos (2008-2012), mostrados nas Tabelas 6 e 7.

De acordo com os dados do satélite TRMM (Tabela 7), durante todo o período estudado, a frequência foi maior nos meses de janeiro a março. Para os anos de 2009 e 2012, foram identificados poucos casos, apenas 6 e 2 casos, respectivamente, número bem inferior aos outros anos. Os dados do DECEA (Tabela 8) identificaram alguns eventos

diferentes daqueles obtidos pelo TRMM, e com maior incidência nos meses de dezembro e fevereiro.

Fazendo uma comparação, entre as duas fontes de dados analisadas, nota-se que, apesar das diferenças na frequência das trovoadas, as mesmas continuaram ocorrendo sempre nos meses de dezembro a maio e ausentes nos meses de junho à setembro. Em alguns casos houve situações em que os dados do aeroporto registraram alguns eventos de trovoadas e que não foram registrados pelo satélite TRMM e vice-versa. Em geral, o satélite TRMM registrou mais eventos com trovoadas do que os dados do aeroporto. Pode-se citar um exemplo, para o mês de janeiro no ano de 2010, onde foram identificados 6 casos pelos dados do satélite e apenas 3 casos pelos dados do aeroporto. O mesmo acontece no mês de fevereiro de 2008, mas de maneira inversa, onde foram registrados 5 casos pelos dados do aeroporto e apenas 3 casos pelos dados do satélite. Destaca-se ainda que nos dias em que ambos

registraram o mesmo evento, foi contado apenas uma vez.

**Tabela 6.** Frequência e soma de trovoadas pelos dados do satélite TRMM, para os três últimos anos analisados (2008-2012).

<b>Ano</b>	<b>Jan</b>	<b>Fev</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>Mai</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Set</b>	<b>Out</b>	<b>Nov</b>	<b>Dez</b>	<b>Soma</b>
<b>2008</b>	2	3	5	1	1	0	0	0	0	0	0	2	<b>14</b>
<b>2009</b>	0	0	1	1	2	0	0	0	0	0	0	2	<b>6</b>
<b>2010</b>	6	1	3	2	0	0	0	0	0	1	0	1	<b>14</b>
<b>2011</b>	5	3	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	<b>13</b>
<b>2012</b>	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>2</b>
<b>Soma</b>	<b>14</b>	<b>8</b>	<b>12</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>-</b>

**Tabela 7.** Frequência e soma de trovoadas pelos dados do Aeroporto Zumbi dos Palmares, para os três últimos anos analisados (2008-2012).

<b>Ano</b>	<b>Jan</b>	<b>Fev</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>Mai</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Set</b>	<b>Out</b>	<b>Nov</b>	<b>Dez</b>	<b>Soma</b>
<b>2008</b>	0	5	3	0	2	0	0	0	0	0	0	4	<b>14</b>
<b>2009</b>	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	<b>4</b>
<b>2010</b>	3	0	2	1	0	0	0	0	0	3	0	1	<b>10</b>
<b>2011</b>	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>3</b>
<b>2012</b>	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>2</b>
<b>Soma</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>6</b>	<b>-</b>

A Tabela 8 indica os valores da soma e da média anual dos dias com trovoadas registrados pelo satélite TRMM juntamente com os registrados pelo DECEA para os anos entre 2008 e 2012. Na Tabela 8 nota-se que o ano de 2008 obteve o maior número de casos dentre os anos estudados, com uma soma de 21 casos e uma média de 1,7 por ano. Entretanto, o mesmo não ocorreu nos anos de 2009 e 2012, pois estes obtiveram um decréscimo importante no número de eventos

registrados, identificando apenas 9 e 4 casos, respectivamente, valores estes considerados um dos menores desde o ano de 1998. A média em 2009 e 2012 decresceu também, ficando somente com 0,7 e 0,3, para estes anos respectivamente. Já os anos de 2010 e 2011 apresentaram uma frequência maior de trovoadas identificando 20 e 16 eventos voltando a obter uma média observada para os anos anteriores (Tabela 1), ou seja, de 1,6 e 1,3 casos/ano, respectivamente.

**Tabela 8.** Média e soma anual da frequência de trovoadas registrado pelo satélite TRMM com os registrados pelo DECEA nos últimos 5 anos.

Ano	2008	2009	2010	2011	2012
<b>Soma dos casos</b>	21	09	20	16	04
<b>Média de casos /ano</b>	1,7	0,7	1,6	1,3	0,3

#### Avaliação dos índices de instabilidade

Foram analisados todos os casos (70 casos), referentes aos anos de 2008 a 2012. O ano de 2008 (Tabela 9), apresentou o maior número de casos encontrados e com isto, os índices de instabilidade mostraram valores bastante variados. Para o índice de energia CAPE+ os resultados foram satisfatórios, se levar em consideração os conceitos dados pela literatura, indicando valores com aparecimento de convecção. O valor mínimo de CAPE+ encontrado foi de 409,0 J.Kg<sup>-1</sup>, considerado pela literatura como convecção fraca e, o valor máximo foi de 2176,0 J.Kg<sup>-1</sup>, considerado como convecção forte. Em geral os valores de CAPE+ para o ano de 2008 mostraram-se com instabilidade moderadas, apresentando 70% dos casos. O índice LI

também se mostrou de maneira satisfatória, indicando valores na faixa de -3 a -8. Quanto a este índice de instabilidade, 85% indicou a ocorrência de trovoadas em Maceió/AL. O índice K indicou somente valores em que mostram tempestades esparsas em quase 30% dos eventos, enquanto que 70% dos outros valores, para o mesmo índice, apresentaram-se abaixo dos padrões. Isto pode ser considerado como um fator não satisfatório, pois contesta com os resultados dos outros índices, onde mostraram a presença de convecção profunda na maioria dos eventos. Por fim o índice TT não apresentou nenhum valor que indicasse a presença de precipitação, ou seja, em todos os casos, os valores apontaram-se abaixo da média, indicando tempo estável.

**Tabela 9.** Valores dos índices K, LI, TT e energia CAPE+, para os casos com trovoadas em 2008.

Ano	Casos	Real			
		CAPE+	K	LI	TT
2008	04/jan	409	11	0	32
	30/jan	798	15	-2	37
	25/fev	714	16	-2	36
	26/fev	1276	22	-4	40
	27/fev	1653	27	-7	43
	28/fev	1848	28	-5	41
	29/02	1972	27	-6	39
	09/mar	1276	19	-4	35
	14/mar	1394	13	-4	34
	17/mar	1597	21	-5	38
	18/mar	1168	23	-4	41
	19/mar	1424	26	-4	39
	23/mar	1079	26	-4	39
	26/mar	1922	22	-8	39
	27/mar	2176	25	-7	41
	07/abr	1369	19	-5	38
	06/mai	1014	28	-4	43
	09/mai	1368	21	-4	34
	25/mai	2104	18	-7	40
11/dez	867	11	-3	38	
12/dez	1393	18	-5	41	

O ano de 2009 (Tabela 10), obteve apenas 9 eventos e dentre eles, pode-se dizer que o índice CAPE+ apresentou valores entre 1000-2000 J.Kg<sup>-1</sup>, ou seja, todos os eventos encontrados com a presença do fenômeno adverso apresentaram-se com instabilidade moderada (100%). O mesmo aconteceu entre os valores de LI, em que variaram de -4 a -7,

indicando forte presença de trovoadas sobre a capital estudada. O índice K encontrou resultados satisfatórios em apenas 30% dos casos encontrados, onde se mostraram com valores entre 27 e 30. O índice TT, para o referido ano, mais uma vez não conseguiu obter resultados satisfatórios em nenhum dos casos com trovoadas.

**Tabela 10** – Valores dos índices K, LI, TT e energia CAPE+, para os casos com trovoadas em 2009.

Ano	Casos	Real			
		CAPE+	K	LI	TT
	<b>03/fev</b>	1723	27	-6	40
	<b>14/mar</b>	1945	14	-6	38
	<b>01/abr</b>	1266	16	-4	35
	<b>09/abr</b>	1432	22	-4	37
<b>2009</b>	<b>09/mai</b>	1656	18	-6	39
	<b>26/mai</b>	1434	29	-5	40
	<b>27/mai</b>	1334	30	-4	40
	<b>25/dez</b>	1585	17	-6	39
	<b>26/dez</b>	1492	20	-7	43

Para o ano de 2010 (Tabela 11), percebe-se um aumento de aparições dos dias com trovoadas (20 dias) e com isso pode-se dizer que os índices de instabilidade obtiveram variações em seus resultados. A começar pelo CAPE+ que obteve valores desde 224,0 à 2554,0 J.Kg<sup>-1</sup>. Os resultados apresentaram 30% indicando forte convecção; 40% dos casos indicaram convecção moderada e; os outros 30%, fraca convecção.

O índice LI obteve um ótimo resultado, onde mostrou presença de fortes trovoadas em 85% dos casos. Entretanto, o índice TT não foi um bom indicador na identificação e análise do fenômeno adverso, mostrando valores abaixo do normal. O índice K também não apontou resultados satisfatórios, onde apenas 10% dos casos apontaram resultados favoráveis à convecção.

**Tabela 11.** Valores dos índices K, LI, TT e energia CAPE+, para os casos com trovoadas em 2010.

Ano	Casos	Real			
		CAPE+	K	LI	TT
2010	05/jan	806	25	-2	40
	12/jan	2012	19	-7	39
	13/jan	1937	20	-6	39
	17/jan	2554	10	-7	34
	19/jan	2208	19	-8	40
	20/jan	2385	17	-8	41
	31/jan	1750	18	-8	41
	07/fev	1673	5	-7	34
	05/mar	1360	18	-4	33
	23/mar	1742	21	-7	39
	25/mar	2245	10	-8	32
	28/mar	1866	22	-5	36
	01/abr	2151	17	-7	36
	07/abr	1953	19	-7	34
	09/abr	1834	32	-8	43
	20/out	851	20	-3	40
21/out	779	25	-3	40	
22/out	328	32	-1	38	
09/dez	224	19	-1	35	
13/dez	777	17	-3	39	

No ano de 2011 (Tabela 12), obteve-se um número de casos inferior ao ano anterior, apresentando apenas 16 eventos com trovoadas. Os índices CAPE+ e LI mostraram resultados suficientes para determinar a ocorrência do fenômeno adverso, em 90% e 100% dos casos, respectivamente. Já os

índices K e TT não obtiveram valores regulares na identificação de instabilidade suficiente para gerar convecção profunda, onde somente 40% dos casos apresentaram resultados moderados para o índice K e, todos os eventos apresentaram-se abaixo da normal para o índice TT.

**Tabela 12** – Valores dos índices K, LI, TT e energia CAPE+, para os casos com trovoadas em 2011.

Ano	Casos	Real			
		CAPE+	K	LI	TT
2011	04/jan	1163	19	-4	36
	11/jan	1325	21	-4	39
	12/jan	1020	25	-4	41
	26/jan	1265	25	-4	39
	30/jan	869	12	-3	39
	24/fev	1356	23	-4	38
	25/fev	1436	25	-5	39
	26/fev	1386	27	-5	39
	05/mar	1317	19	-4	39
	11/mar	1567	18	-5	37
	23/mar	1457	20	-5	40
	09/abr	1464	20	-5	37
	19/abr	1063	23	-4	35
	29/abr	1099	27	-3	39
	30/abr	1244	30	-4	43
02/mai	1203	29	-4	41	

Por fim, em 2012 (Tabela 13), o número de eventos com trovoadas decresceu bruscamente, indicando apenas 4 casos. Nestes casos, pode-se dizer que os índices CAPE+ e LI apresentaram a presença do

fenômeno adverso de intensidade moderada e que, os índices K e TT novamente não conseguiram apresentar bons resultados em nenhum dos casos.

**Tabela 13.** Valores dos índices K, LI, TT e energia CAPE+, para os casos com trovoadas em 2012.

Ano	Casos	Real			
		CAPE+	K	LI	TT
	<b>18/jan</b>	1657	8	-5	35
<b>2012</b>	<b>20/jan</b>	1514	19	-6	39
	<b>21/jan</b>	1185	19	-5	39
	<b>09/fev</b>	1172	-7	-4	35

Em geral, os índices de instabilidade LI e a energia CAPE+ mostraram resultados satisfatórios em 91% e 72% dos casos, respectivamente. Eles apresentaram uma atmosfera propícia à existência de instabilidade moderada que são típicos nas ocorrências de trovoadas para a região de Maceió. Com o índice K foram obtidos resultados significativos em 52% dos casos. Isso não implica dizer que esse índice seja confiável na identificação e previsão do fenômeno adverso. O índice TT, por sua vez, mostrou valores regulares em apenas 7% dos eventos, sendo assim, insatisfatório.

Em relação a estudos de precipitações intensas feitos para o Nordeste Brasileiro, foi visto que, em uma análise termodinâmica da atmosfera para as cidades de Caravelas-BA, Ilha de Trindade-BA, Natal-RN, Petrolina-PE e Recife-PE, os índices CAPE+ mostraram valores elevados nos períodos de chuvas mais significativos em cada uma das estações utilizadas. Os outros índices (K, TT e LI) não indicaram valores compatíveis com a instabilidade nos períodos chuvosos, mas isso pode ter ocorrido devido a serem valores

médios (PEREIRA e CAVALCANTI, 2010). Outro estudo realizado por Gasparetto e Silva (2008), especificamente em Fortaleza-CE, mostrou que o índice LI, em determinados dias, indicou valores entre -4 e 0 situação favorável a chuvas e trovoadas, o índice TT apresentou resultados de 45 a 43, proporcionando baixa instabilidade. Já o índice K variou de 40 à 20, o que indica possibilidade de ocorrência de tempestades. O CAPE+ apresentou valor de aproximadamente 1500 chegando até 22 J.Kg<sup>-1</sup>. Por fim, Santos e Silva et al. (2011), em um estudo realizado sobre Maxaranguape-RN, diz que os mecanismos termodinâmicos não são suficientes para modular o máximo de chuva. Esses índices podem, por exemplo, ser usados em prognósticos climáticos para a região NEB, uma vez que a precipitação simulada por esses modelos apresentam baixa confiabilidade, especialmente sobre latitudes tropicais continentais (BETTS e JAKOB, 2002).



## Conclusões

O trabalho discutiu a frequência das trovoadas para os anos de 2008 a 2012. Foram identificados e analisados 70 dias com trovoadas, que se mantiveram entre os meses de Dezembro à Maio e ausentes principalmente no mês de Setembro. Também se pode notar que os anos que mais apresentaram uma média alta de casos por ano foram os anos de 2008, 2010 e 2011. Em geral, grande parte dos dias com trovoadas foi detectada pelo satélite TRMM do que pelos dados do aeroporto.

A análise dos índices de instabilidade através dos perfis verticais simulados mostraram resultados de CAPE+ e LI satisfatórios, principalmente nos anos de 2009, 2011 e 2012. Em 72% dos casos o primeiro variou entre 1000 e 2000  $J.Kg^{-1}$ , e em 91% dos casos, o segundo indicou valores a partir de -3. Apesar de moderados, são valores típicos dos casos de trovoadas, até então observados na região. Entretanto, o índice K obteve apenas metade dos casos apontando resultados significativos (52%) e o índice TT não conseguiu obter valores satisfatórios, indicando baixa instabilidade.

Em comparação com estudos realizados no Nordeste, viu-se uma aproximação significativa nos resultados obtidos neste trabalho, onde os índices CAPE+ e LI, foram mais confiáveis na identificação de convecção e trovoadas do que os índices K e TT.

Contudo, é correto afirmar que as avaliações dos perfis verticais simulados, através de dados de reanálise podem servir apenas como auxílio na interpretação do fenômeno adverso, uma vez que os mesmos apresentam baixa confiabilidade em grande parte dos resultados. Como foi visto neste trabalho, dos quatro índices apresentados, apenas dois deles são confiáveis para análise e previsão de trovoadas, que são CAPE+ e LI. Também, faz-se necessário analisar outros índices para que se obtenham resultados mais seguros na interpretação do fenômeno adverso.

## Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

## Referencias

Brito, B. M. ; Levit, V. ; Fedorova, N. ; Tenório, R. S. ; Santos, D. M. B. ; Silva, B. F. P. 2008a. Utilização do modelo Hysplit para a previsão de trovoadas no Aeroporto Zumbi dos Palmares, Maceió, Alagoas. In: XV CBMET Congresso Brasileiro de Meteorologia, São Paulo.

Brito, B. M. ; Levit, V. ; Fedorova, N. ; Silva, B. F. P. ; Figueiredo E. L. ; Cavalcanti, J. V. M. 2008. Trovoadas mais intensas nos últimos 10 anos em Alagoas em Fevereiro. In: XV

CBMET Congresso Brasileiro de Meteorologia, São Paulo, 2008b.

Brito, B. M. ; Levit, V. ; Fedorova, N. ; Molion, L. C.B. ; Cruz, C. D. ; Santos, A. G. ; Raimundo, C. C. 2008c. Relação entre as trovoadas e a fase fria da ODP. In: XV CBMET Congresso Brasileiro de Meteorologia, São Paulo.

Brito, B. M. ; Levit, V. ; Fedorava, N. ; Molion, L. C.B. ; Tenório, R. S. ; Rodrigues, R. N. ; Silva, B. F. P. 2011. Análise do comportamento das trovoadas no Estado de Alagoas, previsão a curto prazo. In: Revista Brasileira de Meteorologia, v.26, n.2, 243 – 256..

Clima E Conforto Ambiental: 2011. Um estudo para Maceió. Disponível em: <<http://www.ctec.ufal.br/cct/rcabus/Clima%20e%20Conforto%20Ambiental%20%20Um%20estudo%20para%20Maceio%20v1.0.htm>> Acesso: Novembro.

CPTEC/INPE, 2012. *Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos*, Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br/>>. Acesso em: Dezembro.

Duarte, L. A., Weykamp, F. V. E Gomes, R. G. 2002. Estudo da instabilidade atmosférica em um sistema convectivo de mesoescala. Universidade Federal de Pelotas,

Fedorova, N. 1999. Meteorologia sinótica. Pelotas: Universidade Federal de Pelotas. Editora Universitária, v.1, p. 259.

Figueiredo, J. O. G. R. 2002. Distribuição espacial da pluviometria em Alagoas com ênfase à variabilidade causada pelos padrões de temperatura do mar. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Alagoas – UFAL, Maceió, 148p.

Gasparetto, P., Da Silva, E. M. 2008. Estudo das condições de instabilidade atmosférica e da formação de nuvens sobre a região metropolitana de Fortaleza – Ceará. Congresso Brasileiro de Meteorologia, São Paulo.

Nascimento, E.L. 2005. Previsão de tempestades severas utilizando-se parâmetros convectivos e modelos de mesoescala: Uma estratégia operacional adotável no Brasil? Revista Brasileira de Meteorologia, v.20, n.1, p.121-140.

National Weather Service Forecast Office. Atmospheric Stability Indices. Disponível em: <<http://www.srh.noaa.gov/ffc/html/gloss2.shtml>>. Acesso em: Outubro de 2011.

Pereira, R. C. G., Cavalcanti, E. P. 2010. Índices de instabilidade aplicados ao litoral leste do Nordeste do Brasil. Congresso Brasileiro de Meteorologia, Pará.

Santos e Silva, C. M., Da Silva, F. R., Leme, N. P. 2011. Ciclo anual de precipitação como função de índices de instabilidade termodinâmica e fluxos de energia estática: análises em Maxaranguape-RN. Revista Brasileira de Meteorologia, v.26, n.2, 235 – 242.

TRMM, Tropical Rainfall Measuring Mission, Disponível em: <http://www.nasa.gov/centers/marshall/home/index.html>. Acesso em: Jan-Dez. 2009-2012.

TRMM — Tropical Rainfall Measuring Mission: Bringing remote sensing of precipitation into your classroom. Disponível em:

<[http://geo25.ige.unicamp.br/terraeducativa/v6\\_1/pdf-v6\\_1/TD\\_vi\\_a1-s-link-prss-quality.pdf](http://geo25.ige.unicamp.br/terraeducativa/v6_1/pdf-v6_1/TD_vi_a1-s-link-prss-quality.pdf)> Acesso em 07/11/2011 às 12:12.