



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CEARÁ**  
**AURÉLIO WILDSON TEIXEIRA DE NORONHA**

**ESTUDO QUALITATIVO SOBRE A FORMAÇÃO DOS “TORNADOS” E  
DESCRIÇÃO DOS EVENTOS ACONTECIDOS NOS ANOS DE 2006 A 2009  
NO ESTADO DO CEARÁ**

**FORTALEZA - CEARÁ**  
**2010**

AURÉLIO WILDSON TEIXEIRA DE NORONHA

ESTUDO QUALITATIVO SOBRE A FORMAÇÃO DOS “TORNADOS” E  
DESCRIÇÃO DOS EVENTOS ACONTECIDOS NOS ANOS DE 2006 A 2009 NO  
ESTADO DO CEARÁ

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Física do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Licenciado em Física.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Carlos Santana dos Santos

FORTALEZA - CEARÁ

2010

N852e

Noronha, Aurélio Wildson Teixeira

Estudo qualitativo sobre a formação dos “tornados” e descrição do eventos acontecidos nos anos de 2006 a 2009 no estado do Ceará / Aurélio Wildson Teixeira de Noronha – Fortaleza, 2010.

63p.: il.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Carlos Santana dos Santos

Monografia (Graduação em Física) – Universidade Estadual do Ceará, Centro de Ciências e Tecnologia, 2010.

1. Tornados - Ceara. 2. Tempestade Severa. 3. Simulação Numérica de Tempo. I. Universidade Estadual do Ceará, Centro de Ciências e Tecnologia

CDD:530

AURÉLIO WILDSON TEIXEIRA DE NORONHA

ESTUDO QUALITATIVO SOBRE A FORMAÇÃO DOS “TORNADOS” E  
DESCRIÇÃO DOS EVENTOS ACONTECIDOS NOS ANOS DE 2006 A 2009 NO  
ESTADO DO CEARÁ

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Física do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Licenciado em Física.

Aprovada em \_\_\_ / \_\_\_ / \_\_\_\_\_

BANCA EXAMIDADORA

---

Prof. Dr. Antônio Carlos Santana dos Santos (Orientador)  
Universidade Estadual do Ceará - UECE

---

Prof. Dr. Alexandre Araújo Costa (Co-orientador)  
Universidade Estadual do Ceará - UECE

---

Profa. Dra. Eloisa Maia Vidal  
Universidade Estadual do Ceará - UECE

Aos meus pais, familiares e noiva

DEDICO

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Professor Dr. Antônio Carlos Santana dos Santos pelo apoio moral e científico, orientador desse trabalho.

Ao Professor Dr. Alexandre Araújo Costa idealizador do tema deste trabalho.

Ao Professor Dr. Carlos Jacinto de Oliveira pelo apoio e orientações no âmbito científico.

Ao Professor Dr. João Bosco Verçosa Leal Junior pelas orientações científicas no decorrer do curso de Graduação.

Ao Ms. Cleiton Silva Silveira, colaborador na FUNCEME, nas instruções científicas e das longas conversas sobre o pensar crítico.

A Marcelo Rodrigues, colaborador da FUNCEME, programador na plataforma UNIX, ao me ajudar na execução de algumas rotinas do Cluster.

Aos Colegas de pesquisa, do grupo de Física da Atmosfera, Clodoaldo Campos dos Santos e Francisco de Assis Leandro Filho, que juntos trabalhamos na execução de outros trabalhos, mas que tiveram grande contribuição nesse trabalho.

Aos Professores do Curso de Física da UECE, que além de realizar suas obrigações docente estimularam o meu desenvolvimento do pensar científico.

“De fato, não fracassei ao tentar, cerca de 10.000 vezes, desenvolver um acumulador. Simplesmente, encontrei 10.000 maneiras que não funcionam.”

Thomas Alva Edison

## RESUMO

Os tornados são rotações rápidas de ventos e geralmente estão associados com tempestades severas, fortes rajadas de vento e intensa baixa pressão. Esses fenômenos, aparentemente são raros, no entanto, são potencialmente perigosos para a sociedade civil caso não se tenha um bom prognóstico do tempo ou um monitoramento adequado para tais eventos. Esse trabalho faz um apanhado de dados veiculados em meios de comunicação dos eventos que ocorreram no estado do Ceará do ano de 2006 até 2009, por meio de fotos e relatos de notícia. A fim de se alertar que esses eventos são extremamente perigosos e que cada vez mais os registros desses fenômenos são notórios no estado do Ceará.

**Palavras-chave:** Tornados - Ceará. Tempestade Severa. Simulação Numérica de Tempo.



## **ABSTRACT**

Tornadoes are characterized by very intense rotating winds, usually associated with severe storms, strong wind gusts and intense low pressure. These phenomena are some what rare, however, are potentially dangerous and hence the ability in predict them would be very beneficial. This work provides an overview of information from the media on the tornado-like events that occurred in the state of Ceará between 2006 and 2009, through of photos and news descriptions. Order to alert what this events are dangers extremely and what every more time the phenomenons registers are notorious in Ceará state.

**Keywords:** Tornadoes - Ceará. Severe Storms. Numerical Weather Simulation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Imagem que mostra condições que favorecem o surgimento dos tornados em tempestades severas, a região vermelha na figura indica o local mais propício para a formação de um tornado.....	17
Figura 2	Uma tempestade que move-se para o nordeste e uma formação de um tornado no sudoeste da tempestade.....	19
Figura 3	Velocidade tangencial resultante em cada lado do vórtice do tornado...	22
Figura 4	Múltiplos vórtices formando um único tornado.....	23
Figura 5	Ilustração de uma frente de rajada em uma nuvem precipitante.....	28
Figura 6	Um devastador tornado F5 com cerca de 200 metros sobre Hesston, Kansas, em 13 de Março de 1990, desabrigou cerca de 300 pessoas e deixou 13 feridos.....	29
Figura 7	Tornado F4 na cidade de Itú - SP (1991).....	30
Figura 8	Tornado avistado da cidade de Jaguaribara.....	32
Figura 9	Imagens do satélite GOES no dia 11/03/2009 as 17h45min (a) representação colorida (b) canal realçada.....	32
Figura 10	Formação inicial de um tornado avistado na cidade do Eusébio.....	34
Figura 11	Tornado avistado da cidade de Itatira .....	35
Figura 12	Imagens do satélite GOES no dia 28/03/2009 as 14h (a) representação colorida (b) canal realçada.....	35
Figura 13	Tromba d'água avistada na praia de Mundaú em 02 de março de 2006....	36
Figura 14	Tornado avistado na cidade de Fortaleza.....	37
Figura 15	Região de estudo do tornado registrado em 11/mar/2009.....	40
Figura 16	Vorticidade simulada num corte vertical de 50 a 4000 m de altitude na latitude fixa 5.6S e longitude na faixa 39.430W à 39.410W. A razão de mistura da nuvem está representada em linhas de contorno.....	46
Figura 17	Vorticidade simulada num corte vertical de 1200 a 2500 m de altitude na	

	latitude fixa 5.6S e longitude na faixa 39.430W à 39.410W. A razão de mistura da nuvem está representada em linhas de contorno.....	46
Figura 18	Termo de divergência simulado num corte vertical de 1200 a 2500 m de altitude na latitude fixa 5.6S e longitude na faixa 39.430W à 39.410W. A razão de mistura da nuvem está representada em linhas de contorno..	48
Figura 19	Vorticidade simulada numa perspectiva horizontal a 1698 metros associada com a intensidade e direção do ventos entre as coordenadas 5,624S:6,644S e 39,430W:39410W. ....	48
Figura 20	Representação de coordenadas de um sistema de referências relativo a um absoluto.....	60

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1.1	OBJETIVO GERAL.....	14
1.1.1	<b>Objetivo Específico .....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>15</b>
2.1	TORNADO.....	15
2.1.1	<b>Definição.....</b>	<b>15</b>
2.1.2	<b>Formação do Tornado.....</b>	<b>15</b>
2.1.3	<b>Estágios de formação do tornado.....</b>	<b>20</b>
2.1.4	<b>Vento dos tornados.....</b>	<b>21</b>
2.1.5	<b>Contribuição da força de Coriolis na formação de um tornado.....</b>	<b>23</b>
2.1.6	<b>Classificação dos tornados.....</b>	<b>24</b>
2.2	TORNADOS NÃO PRESENTES EM CÉLULAS DE TEMPESTADE.....	25
2.2.1	<b>Landspouts.....</b>	<b>26</b>
2.2.2	<b>Waterspout.....</b>	<b>26</b>
2.2.3	<b>Gustnadoes.....</b>	<b>27</b>
2.3	OCORRÊNCIAS DE TORNADOS.....	28
2.3.1	<b>No mundo.....</b>	<b>28</b>
2.3.2	<b>No Brasil .....</b>	<b>29</b>
2.3.3	<b>No Ceará.....</b>	<b>31</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>39</b>
3.1	REGIÃO DE ESTUDO.....	39
3.2	MODELO NUMÉRICO .....	40
3.3	VARIÁVEIS FÍSICAS ANALISADAS .....	41
3.4	REGISTRO DAS IMAGENS.....	44
<b>4</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>45</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>51</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>53</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>56</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os tornados são rotações rápidas de ventos que ocorrem em torno de uma região de intensa baixa pressão podendo estar presentes ou não em super células de tempestade. Geralmente a coluna de ar giratória pende de uma nuvem *cumulonimbus*, sendo o tornado geralmente visualizado como uma nuvem em forma de funil.

O diâmetro da maioria dos tornados geralmente varia entre 100 a 600 metros, embora alguns tenham poucos metros de largura enquanto outros possuem diâmetros que podem exceder 1600 metros.

Uma das condições que se apresentam necessária para a formação dos tornados são as massas de ar ascendentes e campos de rotações de ventos, que em grande parte são oriundos dos efeitos da força de Coriolis, de rotação da terra.

Para uma tempestade desenvolver um tornado, a massa de ar ascendente já deve apresentar rotação, no entanto, mesmo nas tempestades severas, os tornados se desenvolvem em locais com forte cisalhamento vertical do vento.

O Brasil, segundo Marcelino et al., (2004, p. 750), é atingido anualmente por diversos fenômenos extremos de origem atmosférica. Dentre os estados mais atingidos, Santa Catarina se destaca pois oferece condições climáticas propícias às ocorrências desses eventos.

No Ceará, em especial, a maioria das informações referentes a tais eventos está vinculada apenas a registros em jornais, entrevistas e relatos de pessoas que observaram os fenômenos, sendo que em 2009, no estado, foram registrados três tornados entre os meses de fevereiro e março.

## **1.1 OBJETIVO GERAL**

Catalogar os tornados que ocorreram no Estado do Ceará, afim de despertar a comunidade científica, órgãos governamentais e sociedade civil sobre esses “raros” eventos são potencialmente devastadores.

### **1.1.1 Objetivo Específico**

Organizar e documentar os registros de tornados no Estado do Ceará no decorrer dos anos que inicia em 2006 até o final do ano 2009, podendo gerar dados que possam contribuir para o desenvolvimento científico estadual e regional.

Definir o conceito de tornado, a partir da literatura científica demonstrando seus estágios de formação bem como os fatores que contribuem para sua formação.

Descrever as principais leis físicas da atmosfera que atuam e regem o movimento caótico desses vórtices, bem como, descrevê-las analiticamente e interpretando elas a fim de interesses acadêmicos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 TORNADO

#### 2.1.1 Definição

Os tornados são rotações rápidas de ventos que ocorrem em torno de uma região de intensa baixa pressão e podem estar presentes ou não em supercélulas de tempestade (AHRENS, 2007, p. 273).

Segundo Ferret *apud* Wakimoto e Wilson (1989, p. 1113) o tornado é uma violenta coluna de ar em rotação, e ressalva, que os tornados têm sido muito simulados teoricamente em laboratórios e centros de pesquisa por várias décadas.

O tornado é definido como uma violenta coluna de ar giratória, pendente de uma nuvem *cumulonimbus*, visualizado como uma nuvem em forma de funil (MARCELINO, 2004, p. 224).

Geralmente os tornados estão presentes em nuvens do tipo funil ou até mesmo como pequenos vórtices de poeira e entulho. O diâmetro da maioria dos tornados está entre 100 a 600 metros, embora alguns tenha poucos metros de largura, outros tem diâmetros que podem exceder 1600 metros (LIN, 2007, p. 278).

Em relação ao movimento dos tornados, sua velocidade pode variar entre 11 a 21 m/s, no entanto, eles podem alcançar velocidades maiores que 36 m/s. Quanto ao caminho percorrido, os muitos tornados que duraram poucos minutos, percorreram um caminho com cerca de 7 km.

#### 2.1.2 Formação do Tornado

Atualmente não se sabe muito sobre a formação do tornado, mas geralmente ele tende a se formar em intensos temporais e essa condição de instabilidade

atmosférica é essencial para o desenvolvimento do mesmo.

Na gênese de formação do tornado se observa que parcelas de nuvens rotacionam em um eixo simbólico na base da célula da nuvem. Em seguida observa-se a parede da nuvem descendo em direção ao solo, formando a nuvem funil, (OLIVEIRA *et al.*, 2001, p. 288) movimento descendente da nuvem (parte visível do funil), mesmo não tocando o solo; ao mesmo tempo os vórtices de ar seco e quente levantam bastante poeira e sujeira até que o tornado atinja completamente seu estágio organizado.

Segundo Markowski e Richardson (2009, p. 4) uma condição necessária para a formação do tornado é que uma forte vorticidade vertical seja gerada no solo.

Segundo Rotunno *apud* Wakimoto e Wildson (1989) para que se forme um tornado é necessário uma superposição de massas de ar ascendentes e campos de rotações de ventos.

Os tornados geralmente se formam sob nuvens *cumulonimbus*. O processo que se inicia no movimento descendente da nuvem é denominado de nuvem funil ou de nuvem de parede; finalizando o processo quando o mesmo se dissipa.

A nuvem *cumulonimbus*, geralmente conhecida como nuvem de tempestade, é uma nuvem convectiva que produz precipitação, relâmpagos e por muitas vezes temporais severos. Dependendo das condições atmosféricas do ambiente essas nuvens podem produzir fortes frentes de rajada, tornados e precipitar granizo (FELÍCIO, 2007, p. 28).



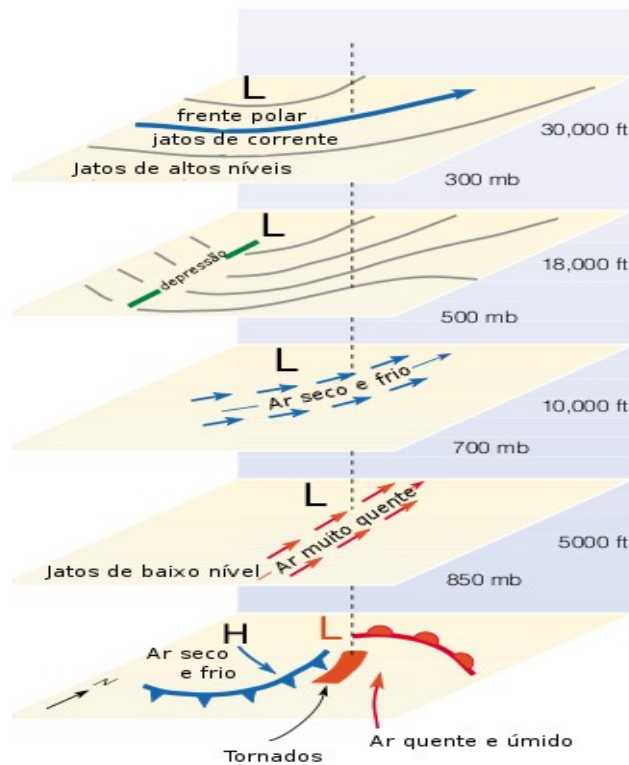


Figura 1 - Imagem que mostra condições que favorecem o surgimento dos tornados em tempestades severas, a região vermelha na figura indica o local mais propício para a formação de um tornado.

Fonte: Adaptado de Ahrens (2007, p. 278).

A região retangular de cor vermelha na superfície do mapa, figura 1, mostra onde os tornado são mais prováveis de se formar. Eles tendem a se formar nesta região devido a posição do ar seco e frio da nuvem sobre o ar quente e úmido, produzindo uma instabilidade atmosférica.

O ar quente e úmido ao encontrar-se com uma massa de ar seca e fria ascende, provocando uma inversão de temperatura. Esse fenômeno de inversão é o principal responsável pela formação de nuvens *cumulonimbus* logo após algumas horas do início da manhã.

Segundo Ahrens (2007, p. 278) a inversão térmica tem um papel importante na atmosfera, pois evita a formação de pequenas e constantes tempestades.

Os jatos de baixos níveis arrastam o ar quente e úmido para dentro da

nuvem, gerando uma condição de instabilidade do ar, e rapidamente pode se desenvolver uma tempestade. No entanto, essa condição de instabilidade não indica a formação de um tornado.

Em sequência, para uma tempestade desenvolver um tornado, a massa de ar ascendente deve estar em rotação, no entanto, nas tempestades severas os tornados somente se desenvolvem em locais com fortes cortes verticais do vento.

Um estudo do National Weather Service (NWS) dos Estados Unidos, define que as tempestades severas são as que possuem ocorrências de tornados, com ventos resultantes acima de 26 m/s e danos associados à rajadas ou granizos de 1,9 cm de diâmetro ou mais (MCNULTY, 1995).

Segundo Ahrens (2007, p. 273) as tempestades severas formam-se em regiões de longos cortes verticais de ventos. Como se observa na figura 1, o rápido aumento da velocidade do vento e a mudança na direção do vento pela altitude – do vento vindo de uma direção em baixos níveis e para outra direção em altos níveis – causa a ascensão da massa de ar, originando uma vorticidade devido ao cisalhamento do vento, para dentro da tempestade gerando um ciclone.

Esta ascendente rotação da coluna de ar vertical com 5 a 10 km de diâmetro é denominado de *mesociclone*.

O *mesociclone* ao se esticar verticalmente e estreitar horizontalmente faz a velocidade tangencial aumentar rapidamente. Dentro dele a velocidade do vento aumenta e pode ser visto uma parede de nuvem descendo gradativamente, como mostra a figura 2, sendo essa região uma possível geradora do tornado.

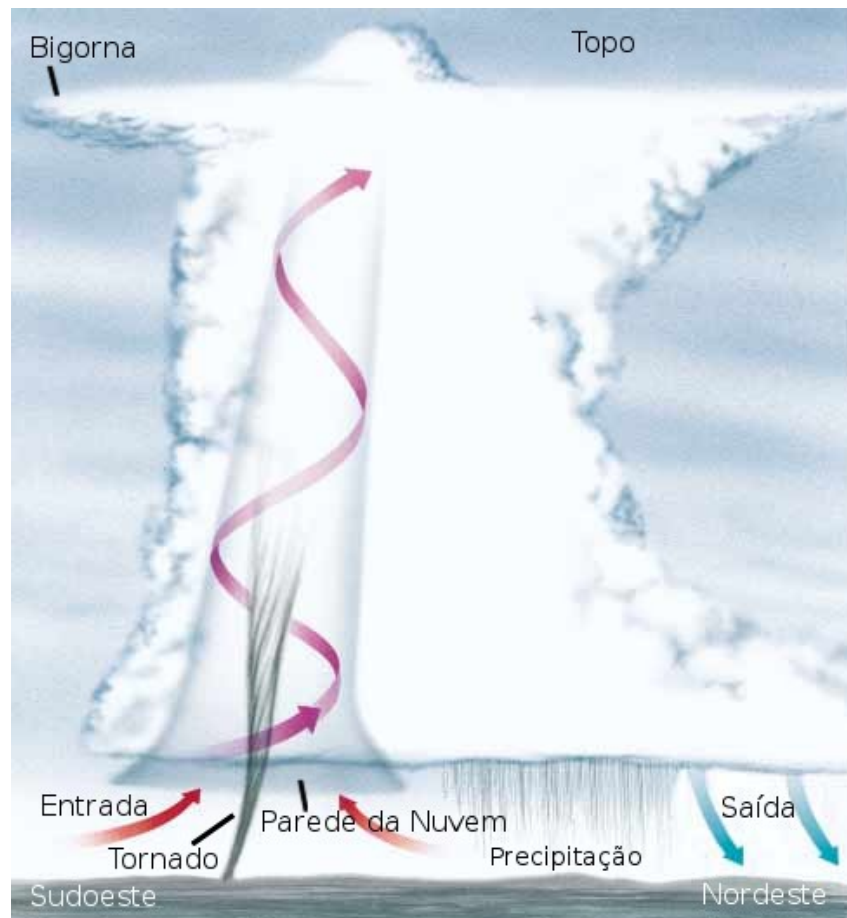


Figura 2 - Uma tempestade que move-se para o nordeste e uma formação de um tornado no sudoeste da tempestade.

Fonte: Adaptado de Ahrens (2007, p. 279).

Como o ar entra rapidamente, no interior do vórtice, a pressão tende a baixar e em todas as direções, este expande, resfria; e essa condição é suficiente para a condensação da nuvem visível que desce, denominada de nuvem funil. O ar fora do vórtice é arrastado para dentro do funil, então, rapidamente ele esfria e condensa e a nuvem funil desce até tocar o solo.

Ahrens (2007, p. 280) relata que fracos tornados não podem se desenvolver em fortes ascensões de massas de ar, no entanto, podem se desenvolver, ao longo de frentes de rajadas esse tipos de tornados são denominados de Gustnados.

Barnes *apud* Markowski e Richardson (2009, p. 4) refere que é amplamente aceito, que a vorticidade vertical inicialmente gera no interior da

tempestade massas ascendentes de ar, isto, como resultado da inclinação e subsequente estreitamento da vorticidade horizontal associado com fortes cortes verticais de vento.

A inclinação da vorticidade horizontal é causada pela massa ascendente de ar, resultando numa vorticidade vertical podendo chegar na ordem de  $10^{-2} s^{-1}$ . No movimento ascendente, aproximadamente e normalmente acima de 1 km, pode se observar um gradiente da velocidade vertical na horizontal pela altura.

Segundo Bluestein *apud* Wakimoto e Wilson (1989, p. 114) o mecanismo de formação dos vórtices de tornados pode ser similar ao que se é observado na formação das trombas d'água e no fenômeno conhecido de nuvem funil.

Muitos dos tornados longos e violentos que se formam são originados de *mesociclones*, no entanto, nem todos os *mesociclones* formam tornados.

A maioria das tempestades severas são supercélulas e essas por sua vez, possuem um maior poder de destruição dentre todos. Supercélulas podem produzir fortíssimos ventos e tornados de longa duração.

Na maior parte dos casos de tornados se observa que na região do funil não ocorre precipitação (OLIVEIRA ET AL., 2001, p. 287) essa característica se deve aos fortes vórtices e correntes ascendentes de massas de ar quente e seco que entram na nuvem; essa região é denominada por Bounded Weak Region Rain, BWER, Região de Fraca Chuva Limitada (LIN, 2007, p. 321).

### **2.1.3 Estágios de formação do tornado**

Segundo Ahrens (2007, p. 273) os tornados podem passar por estágios de organização que vão desde o gênese, estágio inicial, até o estágio de decaimento.

O primeiro estágio denominado por giro de poeira (*Dust-Whire*) é caracterizado pela ascensão da poeira ou fragmentos de sujeira que giram sobre a

superfície, também se observa um deslocamento descendente vertical da nuvem, frequentemente denominado de nuvem tipo funil.

O segundo estágio é chamado de Estágio Organizado (*Organization Stage*), e nesse o tornado se caracteriza pelo o crescimento vertical descendente da nuvem funil e uma maior intensificação dos ventos na região atingida.

O terceiro estágio, chamado de Estágio Maduro (*Mature Stage*), o corpo da nuvem funil adquire maior intensidade e um alinhamento quase vertical chegando a tocar a superfície.

Neste estágio os estragos são percebidos com maior intensidade e alto poder de destruição. Para a medição da intensidade de destruição de um tornado, usualmente, é escolhida a escala de Fujita para realizar a classificação.

O quarto e último estágio chamado de Estágio de Encolhimento (*Shrinking Stage*), se percebe a diminuição total da largura e um crescimento na inclinação do tornado até que o tornado perca totalmente sua estrutura.

No entanto, nesse estágio, o tornado pode provocar vários danos e estragos pois sua intensidade de ventos ainda é forte na região afetada.

#### **2.1.4 Vento dos tornados**

A intensidade dos ventos de um tornado podem destruir casas e edifícios, arrancar árvores, e arremessar para o alto tudo o que estiver sob ele; pessoas, animais, carros, motos, telhados de casas e edifícios e ser encontrados muitos quilômetros do local de origem (AHRENS, 2007, p. 275).

Estudos dos tornados que aconteceram nos Estados Unidos, realizados depois de 1973, revelam que muitos dos poderosos furacões quanto a velocidade do vento raramente ultrapassam 113 m/s. E muitos dos tornados provavelmente tem ventos com velocidades menores que 64 m/s.

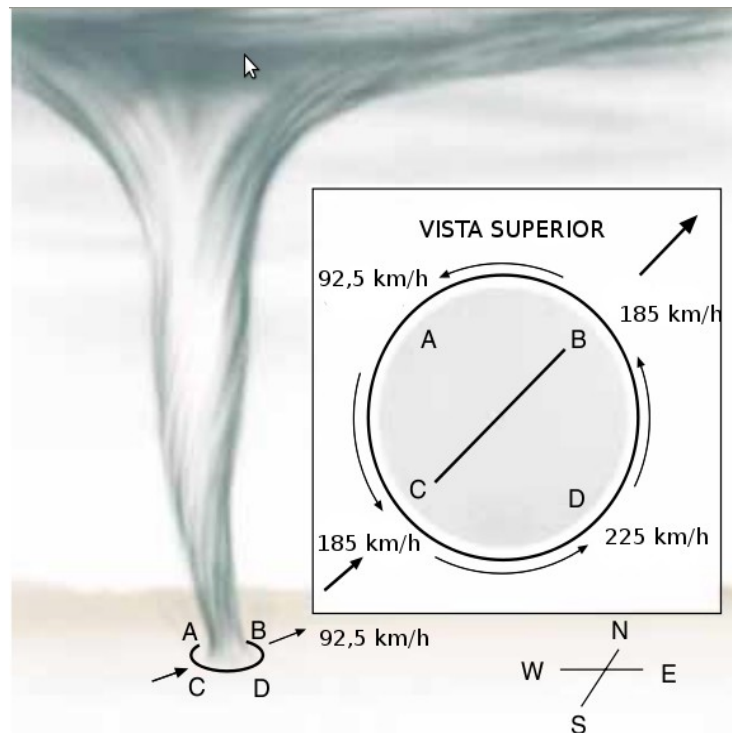


Figura 3 - Velocidade tangencial resultante em cada lado do vórtice do tornado.  
 Fonte: Adaptado de Ahrens (2007, p. 277)

Os intensos ventos do tornado provocam uma baixa pressão na região atingida. Quando passa sobre um telhado, ou um ambiente fechado, que está em condições normais de pressão, provoca um escape da pressão interna da casa ocasionando o lançamento do telhado para o alto ou até mesmo o rompimento das paredes.

A pressão dentro do tornado pode ser maior do que 1 hPa, pressão esta, frequentemente sendo menor que de uma casa na superfície da terra, que ao nível do mar é cerca de 1000 hPa.

No Brasil existem poucos registros de fortes tornados, mas muitos dos violentos tornados, geralmente os que excedem 333 km/h contêm pequenos vórtices dentro deles, que são denominados de vórtices múltiplos (*Multi-Vortex*) os pequenos vórtices são denominados de vórtices de sucção (*Suction Vortex*); a figura 3 ilustra um exemplo de vórtices múltiplos.



Figura 4 - Múltiplos vórtices formando um único tornado.  
 Fonte: Adaptado de Ahrens (2007, p. 277)

### 2.1.5 Contribuição da força de Coriolis na formação de um tornado

Na equação (20), ver anexo D, pode se perceber uma relação intrínseca na força de Coriolis com a latitude de um ponto da Terra, e para o caso de um ponto próximo ao equador essa equação é dada por:

$$\omega \times \vec{r} = \dot{z} \vec{i} - \dot{x} \vec{k} \quad (1)$$

Praticamente, comparando a equação (1) com a equação (20), a força de Coriolis é muito menor no Equador ( $0^\circ$ ) se comparada a uma média latitude como por exemplo o trópico de Câncer ( $23^\circ 26' 22''$  N), no Estados Unidos.

Para o estado do Ceará, devido a sua proximidade da linha do Equador, a equação (1) pouco irá contribuir para a formação de um tornado.

A força de Coriolis indica um dos fatores que contribuem na formação de

tornados, no entanto, isso não é uma condição necessária. Uma análise quantitativa desse termo não será aprofundada neste trabalho.

### 2.1.6 Classificação dos tornados

Os tornados, quanto a intensidade, podem ser classificados desde fracos ou até fortes, e também, podendo ser associados com os estragos gerados quando passam sobre um região, essas características são fundamentais para a classificação de um tornado.

Em 1960, O Dr. T. Theodore Fujita, autoridade renomada, da Universidade de Chicago, propôs uma escala denominada escala de Fujita, que classifica os tornados de acordo com sua velocidade resultantes do vento e os estragos causados quando passa sobre determinado local (AHRENS, 2007, p. 280).

Abaixo segue uma tabela indicando a classificação atual da escala de Fujita que inicia em F0 e variando até F5, respectivamente de fraco até extremamente violento.

**Tabela 1** - Escala Fujita de classificação dos tornados.

<b>Escala</b>	<b>Categoria</b>	<b>Velocidade (Km/h)</b>	<b>Prejuízos geralmente causados.</b>
F0	Fraco	64 - 116	Galhos de árvores quebram, telhados de casas são arremessados para o alto.
F1	Fraco	117 - 180	Árvores são arrancados ou derrubadas
F2	Médio	182 - 253	Quando árvores voam e são arrastadas pela força dos ventos e pequenas estrutura vão ao chão
F3	Médio	254 - 332	Esse tornado é severo carros emborcam, paredes são derrubadas.
F4	Violento	333 - 418	Provoca devastação no local atingido e casas são parcialmente destruídas
F5	Violento	420 - 512	Estruturas de aço do tamanho de carros movem-se cerca de 100 metros.

Fonte: (AHRENS, 2007, p. 277).



Segundo Ahrens (2007, p. 276), nos Estados Unidos estatísticas revelam que a maioria dos tornados são classificados como F0 e F1, ou seja, são tornados descritos como fracos, no entanto, apenas um pequeno percentual dos eventos registrados a cada ano são classificados como F3 e raramente um F5 é registrado no ano.

Embora a escala de Fujita seja largamente usada pelas instituições de pesquisa por cerca de 33 anos, no entanto, a escala possui algumas limitações, que vão desde aos indicadores de estragos, e até mesmo, quando a velocidade dos ventos alcançam valores que geram dúvidas com o descrito pela escala tradicional (MCDONALD ET AL., 2006, p. 2).

Um nova metodologia de classificação foi proposta por um fórum de cientistas e submetido para o National Weather Service (NWS), com o propósito de determinar e classificar os tornados por meio de indicadores de estragos, determinando graus de destruição e velocidade dos ventos. Esses indicadores de destruição classificam os tipos de construções e até mesmo elementos da natureza, como árvores e vegetação (MCDONALD ET AL., 2006, p. 13).

A escala é denominada de *Enhanced Fujita Scale (EF-Scale)*, que transcrito significa escala trabalhada de Fujita.

## **2.2 TORNADOS NÃO PRESENTES EM CÉLULAS DE TEMPESTADE**

As formações de tornados que não estão presentes em supercélulas de tempestade, são denominados *Non-supercell Tornadoes*. Nesse sistema o tornado pode se desenvolver em apenas uma célula de *cumulonimbus* e pode ou não estar associado a tempestades severas com fortes chuvas, relâmpagos ou granizo.

Lin (2007, p. 309) afirma que esses tornados são precedidos ou acompanhados de frentes de rajada por causa da instabilidade atmosférica da região geradora. Esses tipos de tornados podem permanecer ativos ao longo de 20 a 30 minutos. Esses tornados podem ocorrer sobre as águas, e geralmente são denominadas de trombas-d'água e as formações sobre a terra são denominadas de

*landspouts*.

### **2.2.1 Landspouts**

O *Landspouts*, como geralmente são chamados, é um tipo de tornado que possui características similar inerentes ao dos tornados.

Segundo Bluestein *apud* Wakimoto e Wilson (1989), o termo *landspout* foi introduzido para descrever um tornado desenvolvido sobre uma linha de rápida e crescente de *cumulonimbos* similarmente no desenvolvimento das trombas d'águas.

Em sua estrutura não está associado supercélulas de tempestades provenientes de sistemas mesociclônicos. Quando esse tipo de tornado é registrado no país existe a confusão quanto a diferenciação entre os tornados formados em supercélulas de tempestade e em outros casos confundem ao comparar esse evento com os redemoinhos de poeira, frequentemente denominado de *Dust Devil*, cujo processo de formação difere do que será descrito nesse trabalho sobre tornados.

### **2.2.2 Waterspout**

O *Waterspout*, ou frequentemente conhecido como tromba d'água, é uma coluna de ar em rotação que se forma sobre a superfície de grandes extensões de água, como por exemplo, mares ou grandes lagos (AHRENS, 2007, p. 285).

As trombas d'água geralmente possuem o diâmetro de 3 a 100 metros e a velocidade dos ventos pode ser superior a 150 km/h; em adição, eles tendem a se mover mais lentamente, diferentemente, do que se observa nos tornados e sua duração pode variar entre 10 a 15 minutos (AHRENS, 2007, p. 286; BRIDGMAN ET AL., 2005, p. 730).

Segundo (LIN, 2007, p. 314) as trombas d'água podem ter duração variando de 20 a 30 minutos.

Algumas trombas d'água se formam com pequenas tempestades severas, no entanto, muitas se formam com o desenvolvimento de *cúmulos congestus*.

*Cúmulos congestus* são nuvens que podem alcançar em média, dependendo da latitude da região, até 10.000 metros de altitude e sua formação está relacionada à grande instabilidade atmosférica na região e essas nuvem podem produzir grandes cortes verticais ascendentes de ventos, denominados de *updrafts*.

A formação das nuvens *cumulonimbus* está diretamente relacionada com a evolução e crescimento vertical de uma nuvem *cúmulos congestus* (AHRENS, 2007, p. 98).

### **2.2.3 Gustnadoes**

Os *gustnadoes* são vórtices gerados ao longo de frentes de rajadas, ocasionado principalmente por uma instabilidade nos cortes horizontais (XUE, 2002, p. 25).

A frente de rajada é a camada de separação de uma descendente massa de ar sob uma de ar quente, geralmente a massa descendente é mais fria em comparação da massa que vem do solo (AHRENS, 2007, p. 257) .

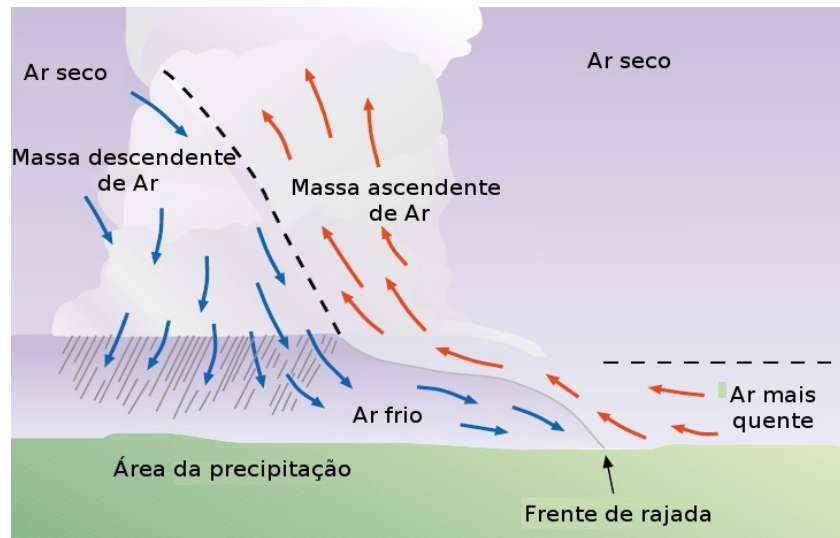


Figura 5 - Ilustração de uma frente de rajada em uma nuvem precipitante.  
Fonte: Adaptado de Ahrens (2007, p. 279).

## 2.3 OCORRÊNCIAS DE TORNADOS

### 2.3.1 No mundo

Os tornados ocorrem em muitas partes do mundo, mas o país que mais experimenta esse fenômeno são os Estados Unidos, no qual em média registra 1000 ocorrências de tornados por ano e em 1998, o registro alcançou um recorde de 1424 ocorrências.

Ainda nos Estados Unidos os tornados ocorrem em diversos estados, mas, a região mais afetada é a região central do estado do Texas até o estado de Nebraska.

O planalto central dos Estados Unidos é uma região muito propícia para a formação de tornado, isso, devido a sua configuração atmosférica estimular a formação de fortes tempestades que contribui para a formação do tornado.

Os destrutivos tornados são muito comuns nessa região, eles podem se desenvolver em qualquer lugar caso as condições para a formação forem satisfeitas. Por exemplo, uma série dos últimos 36 tornados, formados sobre a região central, entre o norte e o sul do estado da Carolina em 28 de Março de 1984

matou 59 pessoas e provocou prejuízos estimados em milhões de dólares. Em 1 de março de 1983, um raro tornado deixou um rastro de 5 km de destruição sobre a cidade de Los Angeles, na Califórnia, destruindo mais de 100 casas e edifícios e ferindo 33 pessoas.

Em 26 de Abril de 1991, um poderoso tornado F5 ocorreu na parte sul do Kansas nos EUA. O tornado percorreu cerca de 110 km em terra, destruiu mais de 100 casas e prédios, feriu severamente centenas de pessoas e matou 17. Um poderoso tornado F5 é mostrado na figura abaixo.



Figura 6 - Um devastador tornado F5 com cerca de 200 metros sobre Hesston, Kansas, em 13 de Março de 1990, desabrigou cerca de 300 pessoas e deixou 13 feridos.  
Fonte: (AHRENS, 2007, p. 278).

### **2.3.2 No Brasil**

No Brasil, segundo Marcelinho et al. (2004, p. 750), o país é atingido anualmente por fenômenos extremos que ocasionam desastres naturais de origem atmosférica. Dentre os estados, o mais atingido é, Santa Catarina afetada por variados fenômenos de origem atmosférica, uma vez que, oferece condições climáticas propícias às ocorrências de tornados.

Em Santa Catarina, o levantamento dos prejuízos socioeconômicos causados por alguns tornados são da ordem de US\$ 1.800.000,00. Estes eventos afetaram diversos setores socioeconômicos, tais como agropecuário, comercial, industrial e público, como o abastecimento de água, energia elétrica e telefonia. Além disso, causaram 11 mortes e deixaram 294 feridos (MARCELINO, 2004, p. 27).

No Brasil o maior tornado já registrado ocorreu em 30 de Setembro de 1991, na Cidade de Itú – SP, atingindo a escala de classificação Fujita F4 (BECK; VERZENHASSI, 2008, p. 194). O evento provocou cerca de 16 mortes e vários feridos que representou a grande maioria, além de, um ônibus que foi capotado pelos fortes ventos, árvores foram arrancadas e outras retorcidas, empilhou carros e destruiu um posto de combustível (POMPÉIA, 2008).



Figura 7 - Tornado F4 na cidade de Itú - SP (1991).  
Fonte:(POMPÉIA, 2008)

### 2.3.3 No Ceará

No Ceará, em especial, todos estes fenômenos registrados, estão veiculados a registros encontrados em jornais, entrevistas e relatos de pessoas que observaram tais eventos e geralmente esses registros predominantemente são realizados por fotos.

O Estado, somente no ano de 2009, sofreu com três tornados entre os meses de fevereiro à março. O tornado no mês de fevereiro atingiu a cidade de Aquiraz, no entanto, desse evento não existem registros de imagens ou de danos contabilizadas.

No dia 11 de março de 2009, segundo (JOATHAN, 2009), dois tornados atingiram as cidades de Jaguaribara e Senador Pompeu, situadas no Sertão Central.

Na cidade de Senador Pompeu, ocorreram sinais de destruição, geralmente típicos de fortes ventos gerados por tornados, sendo que; segundo a notícia, ele se formou sobre as água do Rio Banabuiú.

[...] Segundo o diretor da Rádio Sertão Central AM, Ricardo Coelho, o “funil” se restringiu àquela área, mas fortes ventos atingiram a parte urbana da cidade. “Escureceu de uma hora pra outra. Antes, estava fazendo sol. Então, veio uma chuva forte seguida de ventania, deve ter durado uns 20 minutos” [...] (JOATHAN, 2009)

Na cidade de Jaguaribara não foram registrados sinais de destruição, no entanto um registro fotográfico realizado por um morador.

[...] Segundo Luís Antônio, o tio narrou que o fenômeno aconteceu duas vezes naquela tarde, desaparecendo em minutos. Quando o fato aconteceu não chovia, mas logo depois da passagem do “vendaval” houve uma chuva muito forte. Inicialmente, os moradores acreditavam tratar-se de “uma nuvem chupando água” [...].

(JOATHAN, 2009)

Abaixo segue a imagem do tornado registrado pelo morador, Luis Antônio, da Vila Mateiro, sendo o local de origem da foto distante 35 km da sede do município de Jaguaribara. O registro descreve o exato momento em que foi gerado o tornado sobre a região de Jaguaribara.



Figura 8 - Tornado avistado da cidade de Jaguaribara  
Fonte:(JOATHAN, 2009)

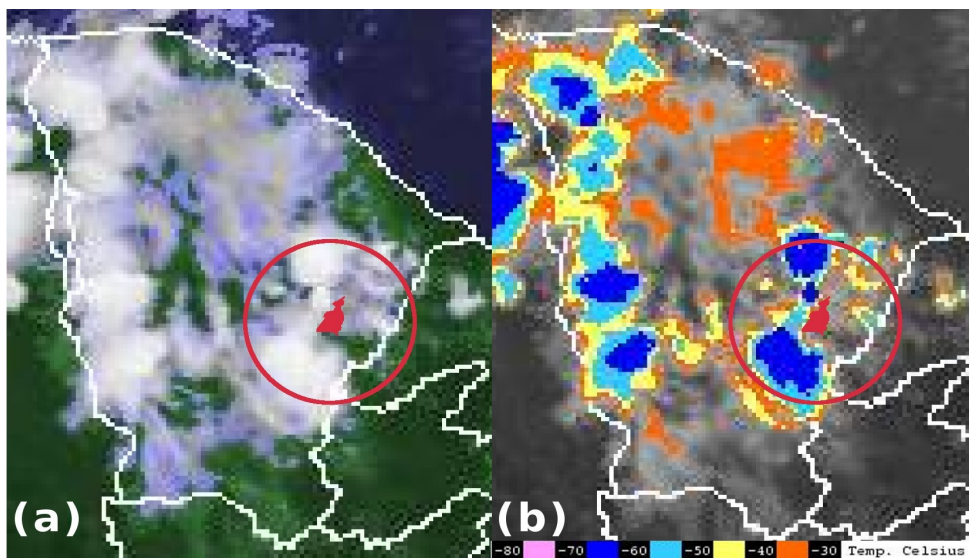


Figura 9 - Imagens do satélite GOES no dia 11/03/2009 as 17h45min (a) representação colorida (b) canal realçada  
Fonte: Adaptado do (INMET)

A figura 9a obtida do satélite GOES representa a cobertura de nuvens do



dia 11 de março de 2009 no horário das 17h45min e como se observa o estado do Ceará está quase que totalmente coberto por nuvens. A figura 9b representa a temperatura no topo das nuvens, podendo classificar o sistema de nuvens que caracteriza a região de Jaguaribara.

Por meio das imagens de satélite no canal realçada se observa dois sistemas atuando na região de Jaguaribara que apresentam temperatura no topo da nuvem de cerca de  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$  indicando que as nuvens são de profundo desenvolvimento vertical sendo um fator determinante de tempo severo.

Na região metropolitana de Fortaleza outra formação inicial de tornado foi registrado por um morador da cidade de Eusébio (ERIC, 2009).

O vídeo foi publicado em um site de enterimento em 11 de fevereiro de 2009, tentativas de contato foram realizados a fim de se verificar a data e hora do evento, no entanto, o autor não respondeu as solicitações.

O registro foi gerado a partir de um vídeo gravado através de uma câmera de celular, a imagem que segue em anexo foi uma captura do momento máximo que o evento conseguiu atingir.

O evento teve duração aproximada de um minuto, quanto a velocidade dos ventos não foi possível serem coletadas, isto devido a incerteza de sua posição com também a indisponibilidade de PCD's na região.



Figura 10 - Formação inicial de um tornado avistado na cidade do Eusébio.  
Fonte: (ERIC, 2009).

Outro tornado, ocorrido na região de São José dos Guerras em 28 de março de 2009 e noticiado em 06 de abril de 2009, foi registrado no Distrito de Lagoa do Mato, em Itatira, distante 219km de Fortaleza. (DIÁRIO DO NORDESTE, 2010).

Sobre esse evento segundo o relato, da Educadora Marilene Araújo, o tornado veio acompanhado de descargas elétricas e chuva forte.

[.] Eles surgiram em três pontos diferentes acompanhados de pontos luminosos e causou medo, disse a educadora.

[.] Os tornados vieram acompanhados de uma chuva longa, raios, trovoadas e muita velocidade. A sensação que se tem é que o tornado chega em alta velocidade. duração da tempestade foi rápida, mas o suficiente para deixar moradores e animais assustados. Essa é a primeira vez que os habitantes da comunidade de Lagoa do Mato presenciam uma cena dessa natureza.[.]



Figura 11 - Tornado avistado da cidade de Itatira  
Fonte:(DIARIO DO NORDESTE, 2010)

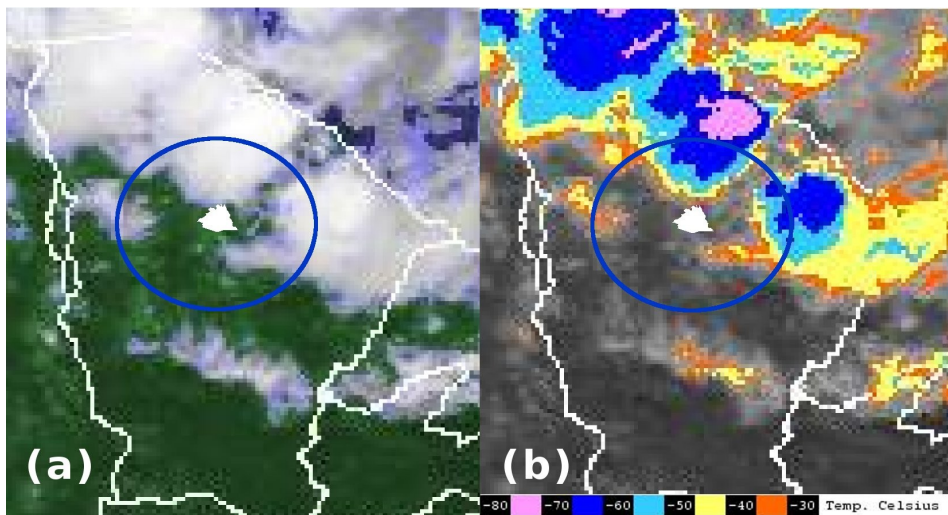


Figura 12 - Imagens do satélite GOES no dia 28/03/2009 as 14h (a) representação colorida (b) canal realçada  
Fonte: Adaptado do (INMET)

A figura 12a obtida do satélite GOES representa a cobertura de nuvens do dia 28 de março de 2009 no horário das 14h e como se observa a região norte e leste do estado do Ceará está quase que totalmente coberto por nuvens. A figura 12b representa a temperatura no topo das nuvens.

Por meio das imagens de satélite no canal realçada se observa três sistemas atuando no Estado apresentando a temperatura no topo da nuvem de cerca de  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$  indicando que as nuvens são de profundo desenvolvimento vertical sendo um fator determinante de tempo severo.

A duração do tornado não foi contabilizada, mas conforme o relato, não teve longa duração.

O tornado ocorreu entre as 13:30 h e 14:00 h do dia 28 de março de 2009, isso não foi informado, no entanto pelo que é descrito na notícia:

[..] A professora Marilene Sousa disse que estava assistindo o Jornal Hoje da TV Globo, quando avistou a cena natural que chegou acompanhada de ventos fortes. “Estava acompanhando o caso de Lagoa dos Patos no Rio Grande do Sul, que mostrava uma matéria idêntica ao que vi aqui em Lagoa do Mato” [..]

A partir dessa informação foi realizada uma investigação no site do Jornal Hoje de onde foi constatado a veracidade do relato e a confirmação do dia do registro (KAMEL, 2009).



Figura 13 - Tromba d'água avistada na praia de Mundaú em 02 de março de 2006  
Fonte: (BARBIERI, 2009).

No dia 02 de março de 2006 outro evento foi registrado no litoral oeste do

Estado, especificamente a praia de Mundaú, pertencente ao distrito de Trairi, distante 150 km de Fortaleza.

Essa região foi atingida por uma tromba d'água, e como mostra a imagem o vórtice descendeu e atingiu a superfície do mar, no entanto, não foram obtidos relatos de estragos ou embarcações prejudicadas pelo evento; nem mesmo as velocidades dos ventos foram medidas (RAM, 2010).

O vídeo não mostra com precisão o início e fim do evento não sendo possível definir o tempo de duração da tromba d'água.

Outra observação foi realizada na região metropolitana de Fortaleza, especificamente em 28 de Abril de 2006, um formação inicial de um tornado foi registrada sobre um edifício na cidade de Fortaleza.

Segundo Santos o registro fotográfico foi realizado em cima de um prédio do Bairro Damas, especificamente sobre o HEMOCE (Centro de Hematologia e Hemoterapia do Ceará).



Figura 14 - Tornado avistado na cidade de Fortaleza.  
Fonte: (SANTOS).

Em resumo a tabela 2 listam os tornados registrados no Estado do Ceará nos

anos de 2006 a 2009.

Tabela 2 - Quantidade de tornados registrados de 2006 a 2009

<b>Ano</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Localidade</b>	<b>Registros de danos</b>
2006	2	Praia de Mundaú e Região Metropolitana de Fortaleza	Nenhum
2009	3	Município do Eusébio, Município de Itatira Região de Jaguaribara (Senador Pompeu)	Sinais de destruição apenas na cidade de Senador Pompeu (tornado avistado em Jaguaribara)

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 REGIÃO DE ESTUDO

A área de estudo engloba uma faixa entre os municípios de Jaguaribara e Senador Pompeu, respectivamente distante 275 Km e 291 Km de Fortaleza; no estado do Ceará.

A cidade de Jaguaribara está localizada na região leste do Estado, latitude 05° 39' 29" (S) e longitude 38° 37' 12" (W).

O local onde ocorreu estragos por causa das fortes ventanias foi a cidade de Senador Pompeu, a sede do município possui latitude 5° 35' 17" (S) e longitude 39° 22' 18" (W).

A região de estudo foi inicialmente determinada através da primeira simulação numérica, a fim de verificar se o modelo inicialmente mostrava alguma perturbação na atmosfera no dia onze de março de 2009.

Nas análises realizadas foi identificado um valor significativo para a vorticidade e intensidade e direção dos ventos a 699,7 metros da superfície do mar numa faixa espacial nos pontos compreendidos entre os pontos 39° 25' 33" (W) a 39° 25' 5" (W) e 5° 37' 41" (S) a 5° 38' 10" (S).

A região é caracterizada pelo IBGE como savana estépica, termo empregado para caracterizar o termo regional Catinga, esse tipo de vegetação consiste de arbóreos de médio porte e pequena densidade na ocupação do solo.

Outra característica importante nessa região é a presença do açude Castanhão, pois, devido a grande extensão o mesmo pode contribuir substancialmente na formação de nuvens na região.

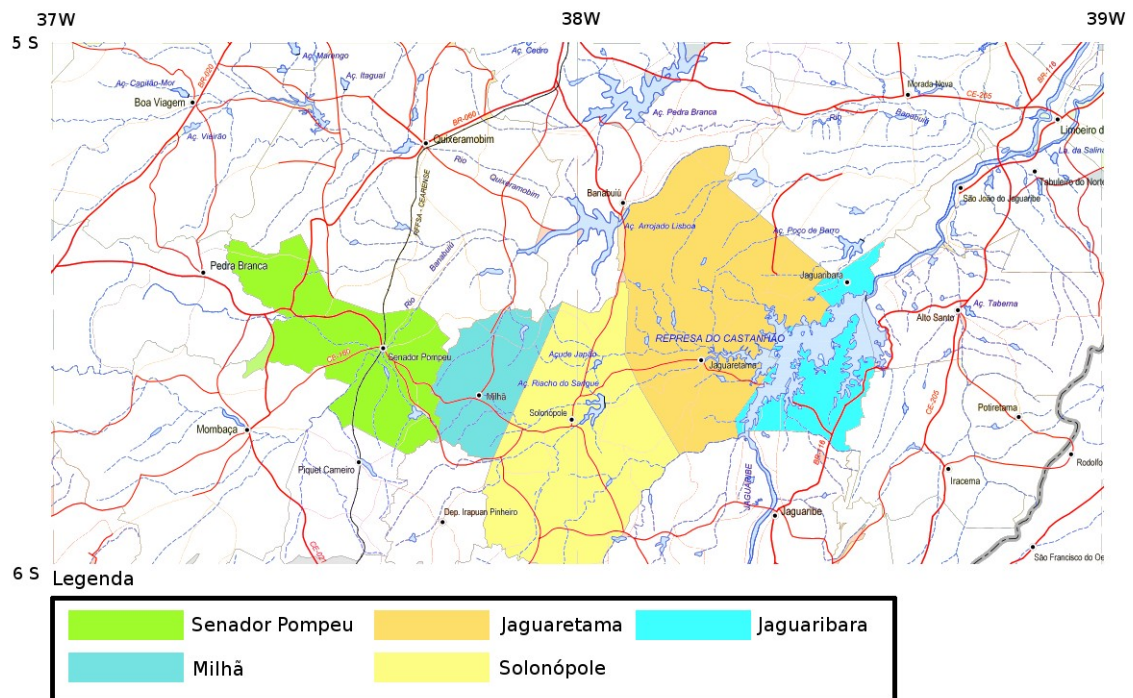


Figura 15 - Região de estudo do tornado registrado em 11/mar/2009  
Fonte:(IPECE, 1998)

### 3.2 MODELO NUMÉRICO

No presente estudo foi utilizado o modelo numérico RAMS 6.0 (*Regional Atmospheric Modeling System*) ,(COTTON ET AL., 2003; PIELKE ET AL., 1992) sendo um modelo de circulação regional e de referencial euleriano.

O modelo RAMS é amplamente aceito e utilizado pela comunidade científica, sejam de pesquisas científicas ou operacionalmente para previsões numéricas de tempo em instituições dedicadas ao assunto, sendo capaz de reproduzir grande parte dos diversos e mais relevantes fenômenos atmosféricos. (MARIA, 2007, p. 34)

As simulações foram inicializadas com dados de grande escala do modelo global GFS (*Global Forecast System*), que tem espaçamento 1°.

Para obtenção de resoluções horizontais maiores é utilizada a técnica de



aninhamento de grades (MARIA, 2007, p. 35). Esta técnica consiste em refinar o espaçamento de grade em determinadas regiões de um domínio inicialmente configurado.

Nas variáveis de superfície a cobertura vegetal foi escolhido o número 15, que representa policultura, nos arquivos de superfície foram utilizados os arquivos padrão do modelo RAMS. Na simulação não foi inserido o açude do Castanhão.

A simulação foi realizada inicialmente com os dados de entrada GFS O centro da grade escolhido foi de latitude 5.58 S e longitude 39.37 W. Os detalhes sobre as configurações segue na tabela abaixo.

**Tabela 3** - Dados de configuração de entrada do modelo numérico RAMS.

Grade	$\Delta x(m)$	$\Delta y(m)$	$\Delta z_0(m)$	$h_{total}$	Pontos
1	20000.	20000.	60	19700.	80
2	2000.	2000.	60	19700.	122
3	100.	100.	60	19700.	182

### 3.3 VARIÁVEIS FÍSICAS ANALISADAS

Inicialmente procurou-se investigar o comportamento dos ventos na região que ocorreu o tornado, analisando a intensidade e direção do vento. Os resultados da simulação foram plotados utilizando a ferramenta de visualização FERRET sendo esta amplamente usada pelo centros de pesquisa em meteorologia (HANKIN ET AL., 2007).

As componentes horizontais do ventos  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$  foram geradas nos níveis verticais variando de 100 a 4000 metros de altitude acima da superfície do mar.

A vorticidade, comumente denominado vorticidade local, determinado pelo rotacional da velocidade do vento do ar na atmosfera; essa variável identifica a rotação do fluido considerando uma partícula como seu eixo de rotação.

O vetor velocidade do ar na atmosfera comumente é representado pela expressão abaixo:

$$\vec{U} = u\hat{i} + v\hat{j} + w\hat{k} \quad (2)$$

A vorticidade num referencial relativo, ou seja o planeta terra, é determinado pela expressão abaixo:

$$\vec{\omega} = \nabla \times \vec{U} \quad (3)$$

A vorticidade relativa reescrita em coordenadas cartesianas, ou seja substituindo a equação (2) em (3), pode ser representada por:

$$\vec{\omega} = \left( \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) \hat{i} + \left( \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) \hat{j} + \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \hat{k} \quad (4)$$

Na meteorologia da grande escala a vorticidade relativa comumente é analisada pela coordenada vertical do sistema cartesiano de referência. (HOLTON, 2004, p. 92)

Deste modo a expressão utilizada é definida como:

$$\zeta = \hat{k} \cdot \nabla \times \vec{U} \quad (5)$$

Portanto a equação da vorticidade local pela altitude, substituindo (2) em (5) a equação será dada por:

$$\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (6)$$

A velocidade resultante do vento é outra grandeza necessária, pois, ela identifica o comportamento dos ventos no evento simulado, sendo, a mesma escrita pela norma do vetor velocidade.

A expressão é mostrada abaixo:

$$[\vec{U}] = \sqrt{[\vec{u}]^2 + [\vec{v}]^2 + [\vec{w}]^2} \quad (7)$$

Outras medidas importante para a análise dos tornados em um modelo numérico estão inscritos na taxa de variação da vorticidade com o tempo, dado a seguir.

$$\frac{D}{Dt}(\zeta + f) = \underbrace{-(\zeta + f) \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)}_{\text{termo de divergência}} - \underbrace{\left( \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial z} \right)}_{\text{termo de inclinação}} + \underbrace{\frac{1}{\rho^2} \left( \frac{\partial \rho}{\partial x} \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{\partial \rho}{\partial y} \frac{\partial p}{\partial x} \right)}_{\text{termo baroclínico}} \quad (8)$$

O primeiro termo a direita da equação é denominado termo de divergência. A função dele indica se a coluna vertical está convergindo ou divergindo em função do tempo. Caso ela esteja convergindo o vórtice aumentará em módulo sua velocidade tangencial, caso contrário, o modulo da velocidade diminui.

O segundo termo a direita, denominado de inclinação, indica a vorticidade gerada pela inclinação da coluna horizontal, oriunda do cisalhamento do ventos nas na componentes horizontais e verticais.

O terceiro termo a direita, denominado de termo baroclínico, contribui na vorticidade gerada através de características microscópicas do fluído, como a densidade que no mínimo deve possuir duas variáveis independentes sendo elas a pressão e temperatura.

A precipitação foi outra variável analisada, a fim de se verificar a eficiência do modelo na detecção do evento. Segundo Oliveira et al.(2001, p. 287) na maior parte dos casos de tornados se observa que na região do funil não ocorre precipitação.

### 3.4 REGISTRO DAS IMAGENS

As fotos dos tornados apresentados no presente trabalho foram coletadas nos meios de divulgação impressa e na internet, na grande maioria, como blogs e sites sobre o tema estudado.

Apenas duas exceções serão citadas em especial. A primeira é a foto da gênese do tornado registrado na região metropolitana de Fortaleza, figura 14, essa imagem foi enviada por e-mail. A segunda foto foi o registro da gênese do tornado na cidade do Eusébio, figura 10, obtida através da captura de imagem do vídeo publicado no site de entretenimento, *Youtube*.

## 4 RESULTADOS

Os tornados são mais frequentes nas médias latitudes, isso como consequência em parte da força não inercial de Coriolis, no entanto esse efeito não é uma condição necessária. Como o Estado do Ceará encontra-se próximo a linha do equador isso favorece para que os mesmos não sejam frequentes no Estado.

Observa-se que dos registros obtidos dos tornados no Estado do Ceará não configuraram integralmente o estágio maduro de um tornado, exceto a tromba d'água de mundaú ( figura 13 ) que atingiu o estágio maduro, tocando até a superfície do mar.

Observou-se que todos os eventos registrados estavam no período chuvoso do Estado do Ceará, que geralmente se inicia no mês de Janeiro encerrando no mês de Março.

De todos os eventos catalogados no Estado do Ceará apenas um foi confirmado danos, que foi o tornado avistado da cidade de Jaguaribara ( figura 8) com danos registrados na cidade de Senador Pompeu.

No tornado avistado da cidade de Jaguaribara, verificando a figura 8, se observa que a localização do mesmo não foi na mesma cidade, ou seja, indicando que o evento aconteceu distante da localidade, justificando assim o parágrafo anterior.

Percebe-se que nos tornados registrados em Itatira e Jaguaribara após o evento ocorreram chuva, rajadas de ventos fortes, relâmpagos e particularmente em Jaguaribara queda de granizo. Isso indica a formação de tempestade severa e a presença de *cumulonimbus* associados a formação dos tornados.

Tentativas foram realizadas, nesse trabalho, em simular a atmosfera do dia onze de março com o propósito de verificar se o modelo numérico RAMS conseguia

prever o tornado ocorrido na região de Jaguaribara.

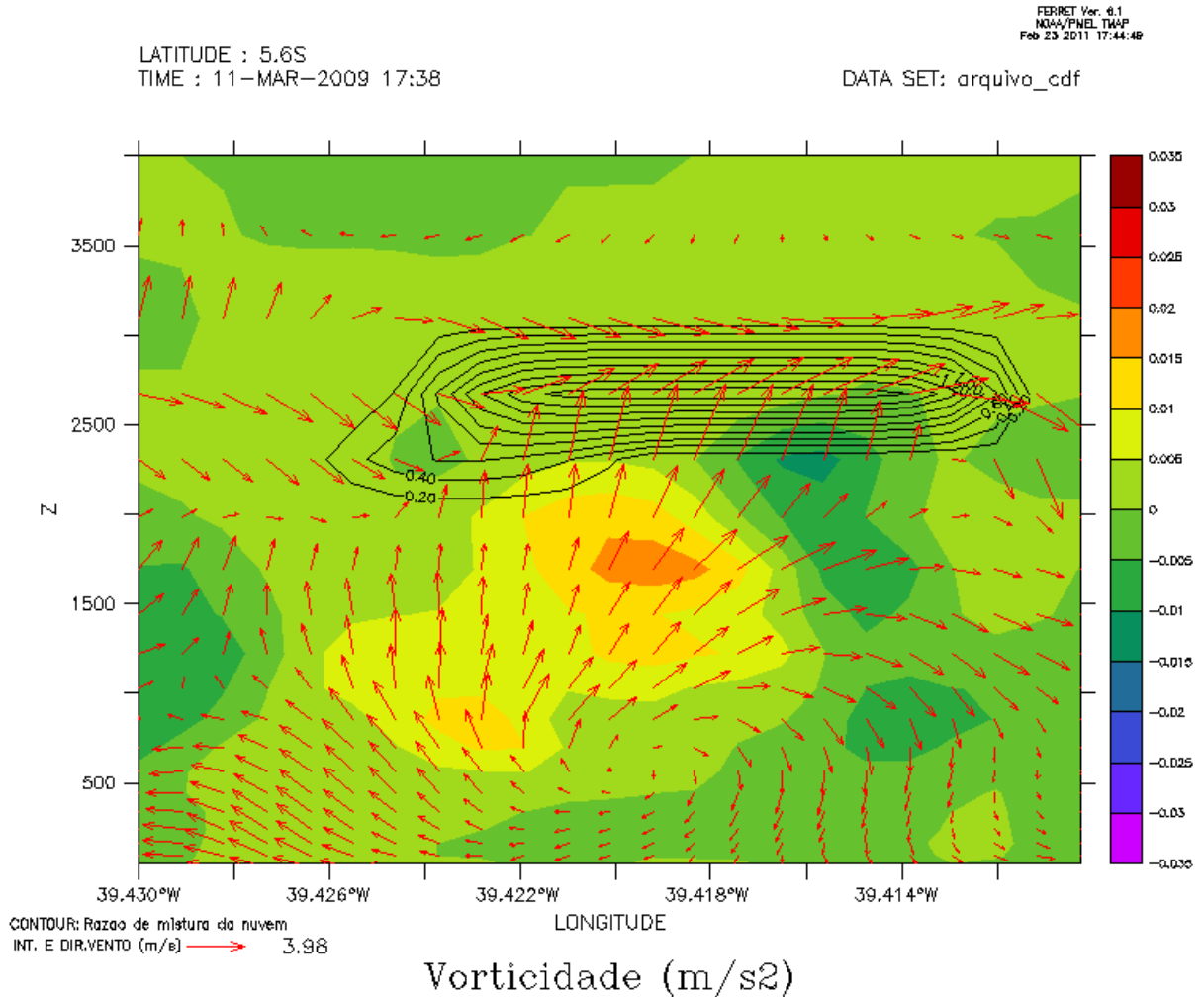


Figura 16 - Vorticidade simulada num corte vertical de 50 a 4000 m de altitude na latitude fixa 5.6S e longitude na faixa 39.430W à 39.410W. A razão de mistura da nuvem está representada em linhas de contorno.

A figura 16 indica a existência de uma célula de nuvem entre 2000 a 3000 metros de altitude e também percebe-se uma região que a base está mais baixa do que em relação ao restante da nuvem.

Associado a esta célula de nuvem existe uma vorticidade positiva em ordem de grandeza de  $10^{-2} m/s^2$  localizada bem próxima da região onde a base da nuvem está mais baixa.

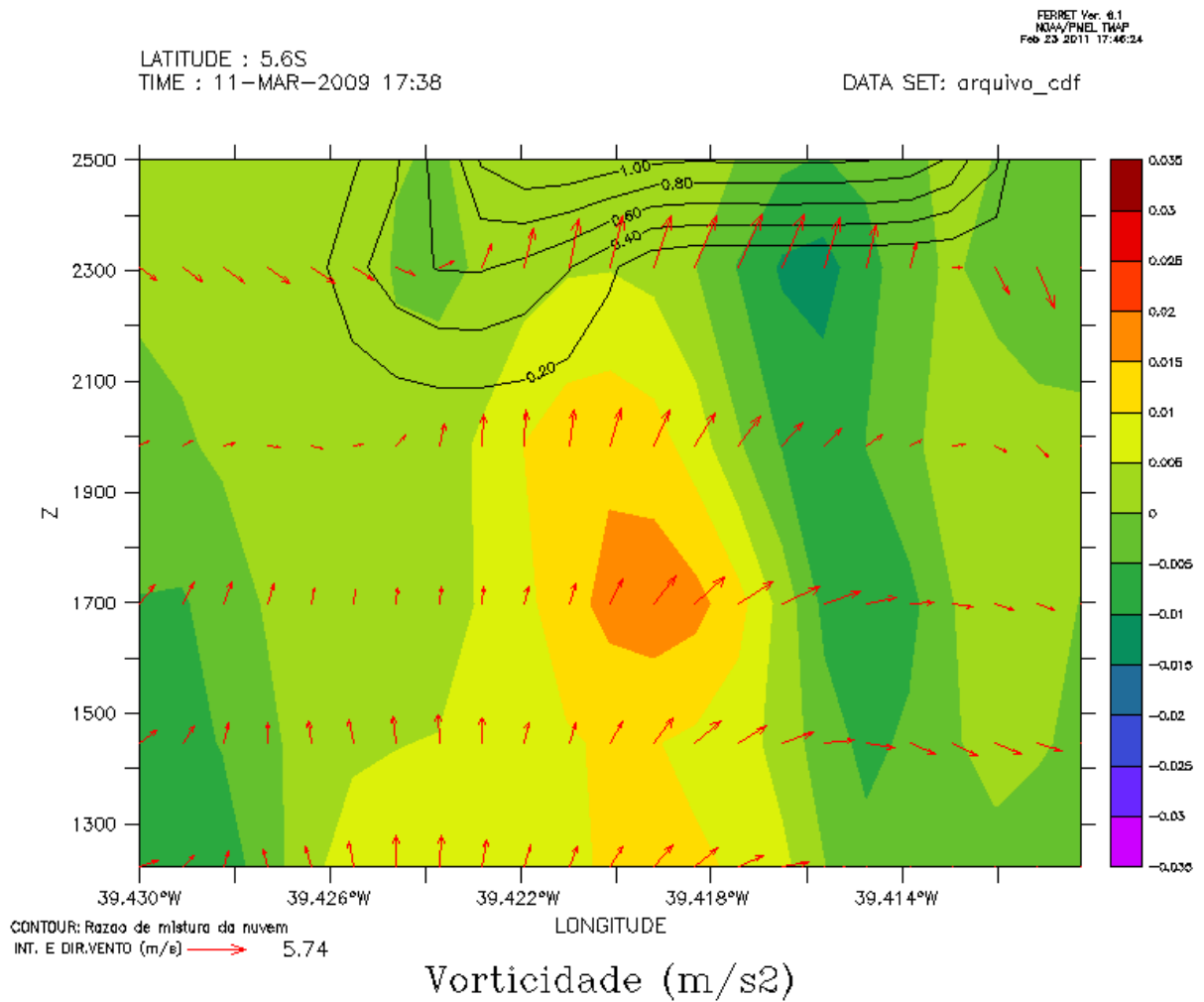


Figura 17 - Vorticidade simulada num corte vertical de 1200 a 2500 m de altitude na latitude fixa 5.6S e longitude na faixa 39.430W à 39.410W. A razão de mistura da nuvem está representada em linhas de contorno.

A figura 17 é um corte ampliado da figura 16 representado a vorticidade num corte vertical de 1200m a 2500m.

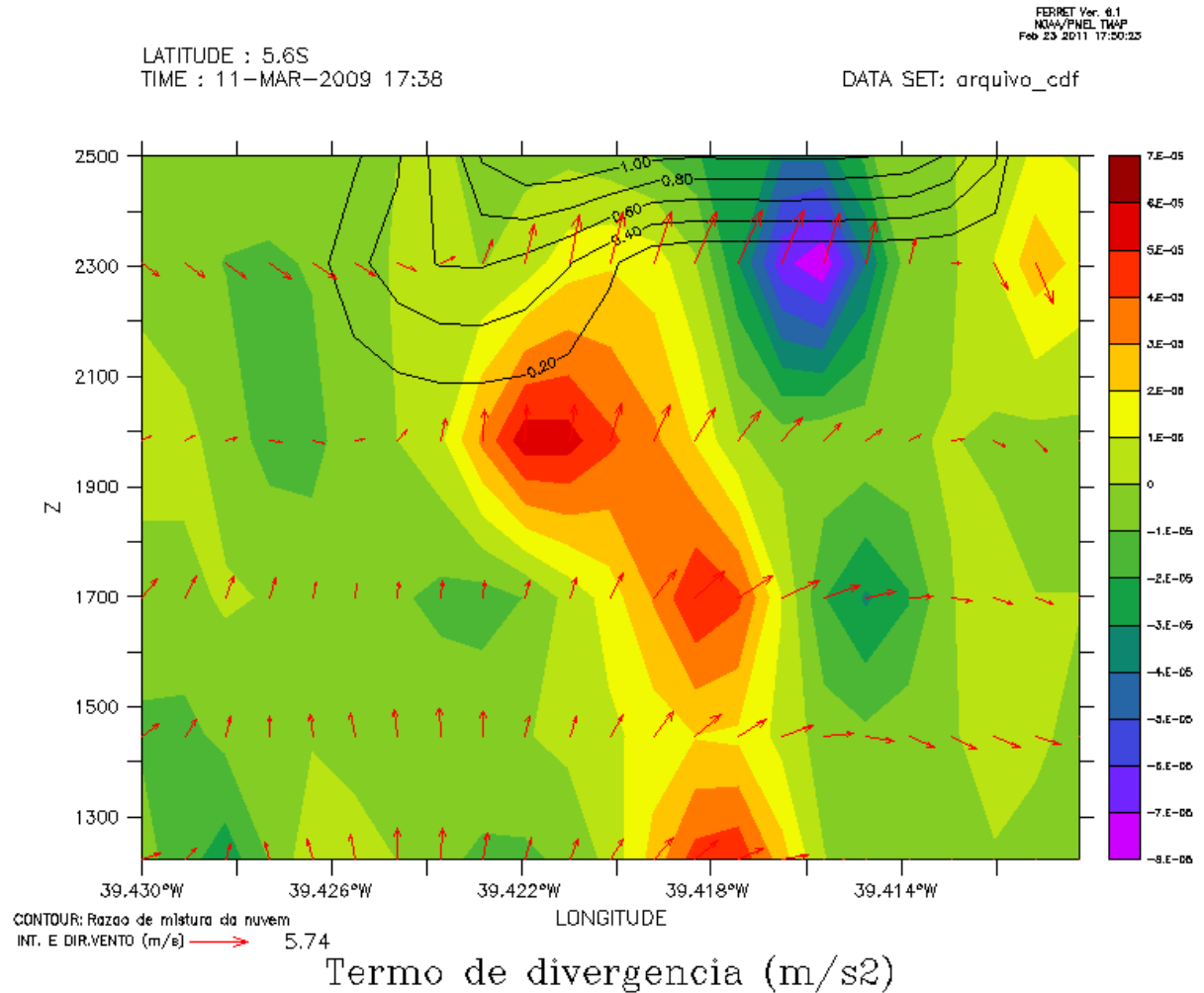


Figura 18 - Termo de divergência simulado num corte vertical de 1200 a 2500 m de altitude na latitude fixa 5.6S e longitude na faixa 39.430W à 39.410W. A razão de mistura da nuvem está representada em linhas de contorno.

A figura 18 representa o termo de divergência, sendo o mesmo o segundo membro da equação de Navier-Stokes descrita na seção anterior. Percebe-se que na mesma área em que foi simulado um alto valor da vorticidade existe uma convergência da massa de ar.



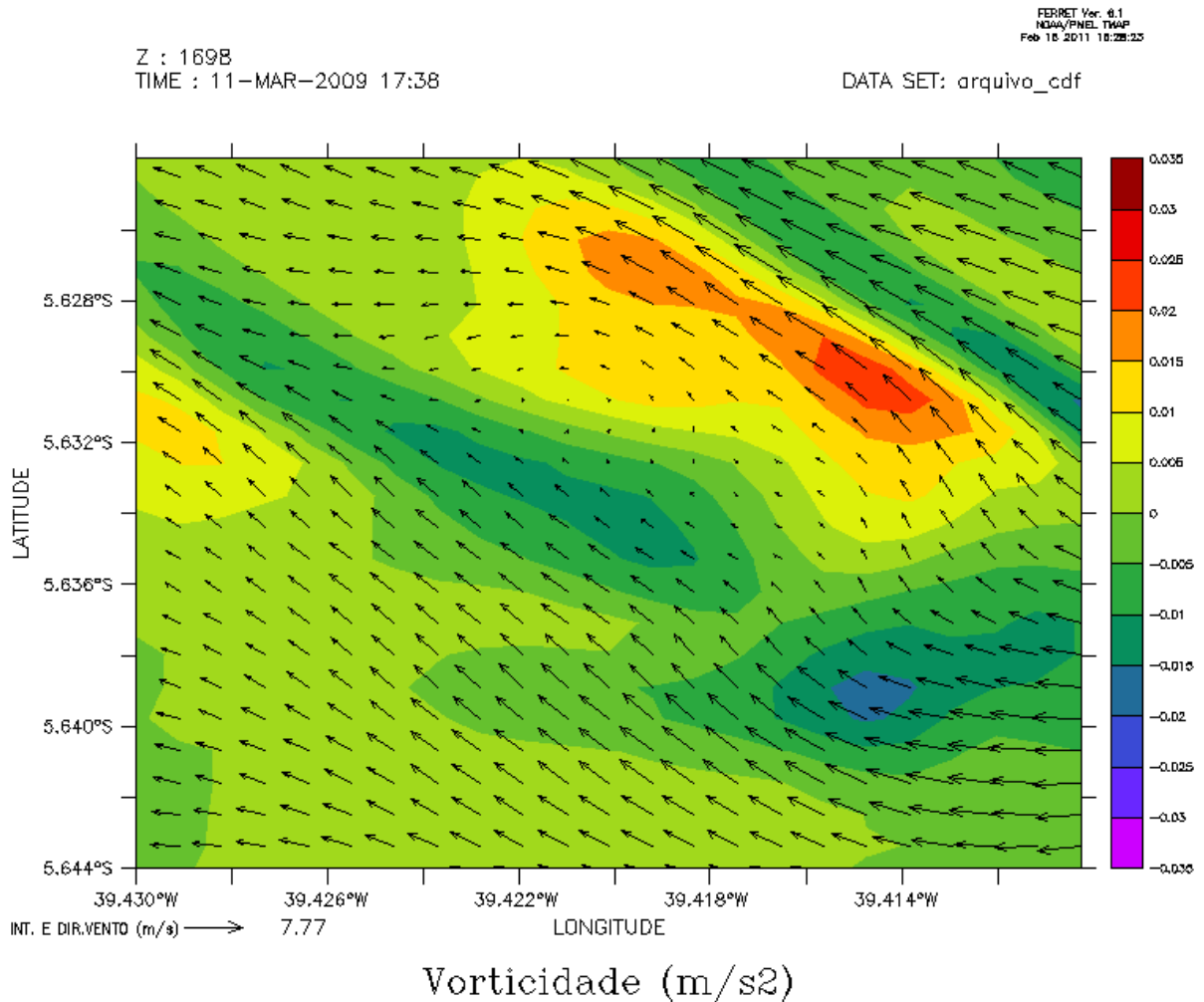


Figura 19 - Vorticidade simulada numa perspectiva horizontal a 1698 metros associada com a intensidade e direção do ventos entre as coordenadas 5,624S:6,644S e 39,430W:39410W.

A figura 19 representa a vorticidade na perspectiva horizontal a 1698 metros de altitude, a escolha dessa altitude se baseia por comparação às figuras 17 e 18, pois a essa altitude se encontra os maiores valores da vorticidade e divergência.

Mesmo sem constatar indícios condizentes com a literatura, como velocidade resultante dos ventos, vorticidade vertical e no termo de divergência, se observou na simulação que sobre o município de Milhã se configurou uma grande variação da vorticidade vertical.

Dessa forma não é possível afirmar, mas, supor que o tornado registrado em Jaguaribara aconteceu próximo a Senador Pompeu, assim, contradizendo a reportagem que informa o registro de dois tornados, no entanto, apenas um tornado atingiu a região Jaguaribana.

E os prejuízos registrados na cidade de Senador Pompeu, em consequência dos fortes ventos, podem estar relacionados com o sistema que gerou o tornado avistado da Cidade de Jaguaribara.

## 5 CONCLUSÃO

Nos tornados registrados no Ceará não é possível afirmar se estão mais frequentes ou menos frequentes. Pois, nesse trabalho não foi possível estabelecer qualquer relação estatística acerca dos eventos associados aos tornados no Estado do Ceará.

Esse aumento nos registros talvez se deva à evolução tecnológica que a sociedade esteja passando, isto é, na aquisição de celulares equipados com câmera, câmeras digitais e outros recursos.

No entanto não se pode, nesse trabalho, esquecer que esses eventos também podem estar interligados com as mudanças climáticas globais, a ação do homem mudando o meio em que vive.

No tornado avistado de Jaguaribara talvez sua formação possa estar associado a mudança da paisagem original que nos últimos sete anos mudou drasticamente.

Mudança causada pela construção do açude Castanhão, obra iniciada em 1995 e concluída em 2003, o açude ocupa uma área de  $325 \text{ km}^2$  (JÚNIOR, 2001, p. 16). Numa pequena ação humana como esta, comparada com a extensão territorial do planeta, não se sabe ao certo, quais serão as consequências para o comportamento atmosférico na região.

Acredita-se que modelos numéricos possam melhorar seus resultados, isto é, diminuindo a incerteza de suas previsões, caso os elementos de entrada como topografia e cobertura vegetal sejam devidamente configurados na região de estudo, em particular nesse trabalho a simulação realizada não fez o uso desses elementos.

Os eventos registrados aqui no Estado servem como alerta a fim que se

perceba que diferente de outras regiões do País, como a Região Sul por exemplo, os tornados são fenômenos que possuem grande potencial destruidor e que existem medidas básicas de segurança que podem ser tomadas a fim de resguardar a vida de quem está próximo de um evento como esse. (Anexo A)

## REFERÊNCIAS

AHRENS, C. D. Cloud Development and Precipitation. In\_\_\_\_ **Essentials of Meteorology: An invitation of Atmospheric** Hammond: Owlsbooks, 3 ed., p.110-140 2007.

BARBIERI, P. **Tromba D'água e Tornado no Ceará. PAPO DE METEORO - BLOG SOBRE METEOROLOGIA** Blog, 2009, Julho 25. Disponível em: <<http://papodemeteoro.blogspot.com/2009/09/tromba-dagua-e-tornado-no-ceara.html>> Acesso em: 10 Abr 2010 .

BECK, A. T.; VERZENHASSI, C. C. Risk optimization of a steel frame communications tower subject to tornado winds. **Latin American Journal of Solids and Structures**, v. 1, n. 5, p. 187-203 2008.

BRIDGMAN, H.; HAY, J.; DIAZ, H.; GLANTZ, M.; THORNES, J. **ENCYCLOPEDIA OF WORLD CLIMATOLOGY**. New York: Springer, 4 ed. 2005.

COTTON, W.; PIELKE, R.; WALKO, R.; LISTON, G. Current status and future directions. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 82, n. 1-4, p. 55-29 2003.

DIARIO DO NORDESTE. **Tornado causa medo em moradores de Itatira. Diário do Nordeste** Fortaleza: 2010, Abril 7. Disponível em: <<http://virtual.diariodonordeste.com.br/home.aspx>> Acesso em: 01 Abr 2010 .

ERIC, D. Tornado Eusébio. Eusébio: 2009. Disponível em: <<http://www.youtube.com/watch?v=hrHJlI8Rbnc>> Acesso em: 18 Maio 2010 .

FELÍCIO, R. A. **FLG 0355 Climatologia II**. 2007. Disponível em: <[http://www.geografia.ffe.usp.br/graduacao/apoio/Apoio/Apoio\\_Felicio/climall/CircSecundaria.pdf](http://www.geografia.ffe.usp.br/graduacao/apoio/Apoio/Apoio_Felicio/climall/CircSecundaria.pdf)> Acesso em: 01 Mar 2008 .

HANKIN, S.; CALLAHAN, J.; MANKE, A.; O'BRIEN, K.; LI, J. **FERRET Data Visualization and Analysis**. Seattle, WA: PMEL FERRET, 2007.

HOLTON, J. R. Circulation and Vorticity. In\_\_\_\_ **AN INTRODUCTION TO DYNAMIC METEOROLOGY** Seattle, Washington: Elsevier Academic Press, 4 ed., p.553 2004.

INMET. **DSA - Anteriores - Goes. DSA Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais** Banco de imagens, Disponível em: <[http://satelite.cptec.inpe.br/acervo/goes\\_anteriores.jsp](http://satelite.cptec.inpe.br/acervo/goes_anteriores.jsp)> Acesso em: 05 Ago 2010 .

IPECE. **Mapa Municipal de Jaguaribara**. Fortaleza: 1998. Disponível em: <[http://www2.ipece.ce.gov.br/cartografia\\_1/Mapas%20Municipais/J-L-M\\_pdf/Jaguaribara.pdf](http://www2.ipece.ce.gov.br/cartografia_1/Mapas%20Municipais/J-L-M_pdf/Jaguaribara.pdf)> Acesso em: 18 Abr 2010 .

JOATHAN, Í. **Tornados assustam população no Interior**. **Diário do Nordeste** Fortaleza: 2009, Março 11. Disponível em: <<http://virtual.diariodonordeste.com.br/home.aspx>> Acesso em: 15 Mar 2009 .

JÚNIOR, L. F. C. **TECTÔNICA RÚPTIL E SISMICIDADE NA ÁREA DE INUNDAÇÃO DO AÇUDE DO CASTANHÃO (CE): IMPLICAÇÕES PARA O RISCO SÍSMICO**. 2001. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica), Natal, 2001, Fevereiro. Disponível em: <[http://bdtd.bczm.ufrn.br/tesdesimplificado/tde\\_busca/processaArquivo.php?codArquivo=393](http://bdtd.bczm.ufrn.br/tesdesimplificado/tde_busca/processaArquivo.php?codArquivo=393)> Acesso em: 21 Set 2010 .

KAMEL, A. **Tromba d'água assusta moradores do RS**. **Jornal Hoje** 2009, Março 28. Disponível em: <<http://g1.globo.com/jornalhoje/0,,MUL1062812-16022,00-TROMBA+DAGUA+ASSUSTA+MORADORES+DO+RS.html>> Acesso em: 05 Ago 2010 .

LIN, Y. Tornado Dynamics. In\_\_\_\_\_ **Mesoscale Dynamics** Cambrigde: Cambrigde, 3 ed., p.309–321 2007.

MARCELINO, I. P. V. D. O. **Análise de episódios de tornado em santa catarina: caracterização sinótica e mineração de dados**. 2004. Dissertação (Pós-graduação em Sensoriamento Remoto) - INPE, São Paulo, 2004.

MARCELINO, I. P. V. D. O.; FERREIRA, N. J.; ANDRÉ, I. N. Análise geográfica do tornado ocorrido no município de Joinville-SC em 31/01/1999. In\_\_\_\_\_ **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE DESASTRES NATURAIS. Anais...** Florianópolis: GEDN/UFSC, p.749–761 2004.

MARIA, P. H. S. **Modelagem numérica em alta resolução para previsão de geração de Energia Eólica no Ceará**. 2007. ( Mestrado Acadêmico em Ciências Físicas Aplicada ) Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2007.

MARKOWSKI, P. M.; RICHARDSON, Y. P. Tornadogenesis: Our current understanding, forescating considerations, and question to quide future research. **Atmospheric Research**, v. 93, p. 3–10 2009.

MCDONALD, J.; MEHTA, K.; BURGESS, D.; ET AL. Enhanced Fujita Scale (EF-Scale). Texas Tech University: WIND SCIENCE AND ENGINEERING CENTER, 2006.

MCNULTY, R. P. Severe and Convective Weather: A Central Region Forecasting Challeng. **Monthly Weather Review**, v. 10, n. 2, p. 188–202 1995.

NOAA; FEMA; THE AMERICAN RED CROSS. **Tornadoes ... Nature's Most Violent Storms.** 1995. Disponível em: <<http://www.nssl.noaa.gov/edu/safety/tornadoguide.html>> Acesso em: 10 Abr 2010 .

OLIVEIRA, L. L.; VIANELLO, R. L.; FERREIRA, N. J. Sistemas Atmosféricos Extratropicais e Tropicais. In \_\_\_\_\_ **Meteorologia Fundamental** Erechim - RS: Edifapes, 1º ed., p.266–295 2001.

PIELKE, R.; COTTON, W.; WALKO, R.; ET AL. **A comprehensive meteorological modeling system—RAMS.** *Meteorology and Atmospheric Physics*, v. 49, n. 1, p. 69-69 1992.

POMPÉIA, A. **Relembrando o Tornado de Itu, 30/09/1991. FOTOS DE NUVENS, RAIOS, TEMPOESTADES, ETC...** 2008. Disponível em: <<http://aleosp2008.wordpress.com/2008/09/02/relembrando-o-tornado-de-itu-30091991/>> Acesso em: 20 Maio 2010 .

RAM. **Tornados en América del sur.** *Revista del Aficionado a la Meteorología* 2010. Disponível em: <<http://www.meteored.com/ram/2543/>> Acesso em: 13 Abr 2010 .

SANTOS, A. C. S. **Fotos de um INICIO DE FORMAÇÃO DE Tornado - FORTALEZA.** [mensagem pessoal] Mensagem recebida por <dr.acss@gmail.com> em 21 Maio 2009 .

WAKIMOTO, R. M.; WILSON, J. W. Non-supercell tornadoes. *Monthly Weather Review*, v. 117, n. 6, p. 1113–1140 1989.

XUE, M. **Tornado Dynamics.** 2002. Disponível em: <<http://twister.ou.edu/MM2002/TornadoDynamics.pdf>> Acesso em: 01 Mar 2010 .

**ANEXOS**



## ANEXO A - MEDIDAS DE SEGURANÇA NA PRESENÇA DE TORNADOS

Os tornados são eventos caracterizado por fortes rajadas de ventos e internamente uma enorme região de baixa pressão por onde passa.

Ao se aproximar um tornado, caso seja possível, a família deve evacuar a casa ou edifício. Caso não seja possível realizar a evacuação, a família deve se dirigir a um local da casa onde não existam janelas; ou se for em um prédio procurar um porão. Os lugares mais seguros recomendados são: banheiro, compartimentos sem janelas, interior de uma escada.

Caso seja uma escola o local atingido pelo tornado, as pessoas devem procurar escadas ou corredores, caso sejam os corredores, os alunos devem se manter deitados no chão com a mão sobre a cabeça ou cobertas.

Se for fora de casa, sair e procurar um local firme, evitar tampas de bueiros, pontes de madeira e elementos dessa natureza; caso não exista um local firme a pessoa deve se deitar, preferencialmente num buraco ou depressão, colocando as mãos sobre a cabeça.

Na tentativa de fuga do tornado, em um carro, não se deve tentar superar a velocidade do mesmo, pois, eles podem alcançar velocidades superiores a 130 km/h; assim a pessoa deve sair do veículo e procurar um lugar seguro. (AHRENS, 2007, p. 276; NOAA ET AL., 1995, p. 10)

## ANEXO B - DIÁRIO DO NORDESTE TORNADO DE JAGUARIBARA

## FENÔMENO DA NATUREZA



Tornado se formou duas vezes na Vila do Mineiro, em Jaguaribara, e foi fotografado pelo comerciante Raimundo Saldanha

# Tornados assustam população no Interior

Desde fevereiro, três minitornados foram registrados no Ceará. Fenômeno é normal e pode voltar a acontecer

ICARO JOATHAN  
Repórter

**Fortaleza.** A famosa cena de pessoas fugindo desesperadas de um tornado, comum em filmes norte-americanos, não está tão distante da nossa realidade como se pensava. Desde o mês passado, pelo menos três "minitornados" foram registrados no Ceará. Os mais recentes foram no sábado passado, nos municípios de Jaguaribara e Senador Pompeu, a 227 e 275km da Capital, respectivamente. Em fevereiro, o fenômeno já havia acontecido em Aquiraz, na Região Metropolitana de Fortaleza.

Os dois tornados do último sábado aconteceram à tarde. O de Jaguaribara atingiu a localidade de Vila do Mineiro, a cerca de 35km da sede municipal, e foi registrado em fotos pelo comerciante Raimundo Saldanha. Sem computador, o sertanejo descarregou as fotos na casa do sobrinho, o estudante Luís Antônio Saldanha, na cidade vizinha de Jaguaribe.

Segundo Luís Antônio, o tio narrou que o fenômeno aconteceu duas vezes naquela tarde, desaparecendo em minutos. Quando o fato aconteceu não chovia, mas logo depois da passagem do "vendaval" houve uma chuva muito forte. Inicialmente, os moradores acreditavam tratar-se de "uma nuvem chupando água". A ocorrência, porém, não deixou estragos.

Em Senador Pompeu, o mi-



ni-tornado aconteceu próximo ao Rio Banabuiú. Segundo o diretor da Rádio Sertão Central AM, Ricardo Coelho, o "funil" se restringiu àquela área, mas fortes ventos atingiram a parte urbana da cidade. "Escureceu de uma hora pra outra. Antes, estava fazendo sol. Então, veio uma chuva forte seguida de ventania, deve ter durado uns

20 minutos", narra. Conforme o radialista Joalano Tavares, a população ficou em pânico.

Diferente de Jaguaribara, os ventos provocaram destruição. Muros, uma torre de transmissão de internet e uma árvore centenária de eucalipto caíram, a aparelhagem da rádio foi danificada pelos raios que acompanharam a chuva e aparelhos

domésticos foram queimados. No bairro de Pavãozinho, choveu granizo, outra característica dos tornados.

### Fenômeno comum

Segundo o gerente do Departamento de Meteorologia da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (Funceme), David Ferran, a formação de tornados é comum durante o período chuvoso, apesar de não ser frequente. Porém, é difícil aferir se a frequência deles está aumentando, pois, são muito localizados e duram de dois a três minutos. Assim, os equipamentos meteorológicos não conseguem detectar a formação das nuvens associadas aos tornados. "A melhor detecção acaba sendo o olho humano", diz. A popularização de máquinas digitais e celulares pode explicar a maior incidência de registros no Estado.

Conforme o especialista, os tornados são classificados pela "Escala Fujita" na categorias F0 e F5, do menor para o maior potencial de destruição. Os que vêm acontecendo no Ceará são da intensidade mais baixa, com ventos de 64 a 116 km/h. O encontro de ar seco com ar úmido e de ventos em diferentes direções formam o fenômeno, que geralmente precede a chuva depois de um período seco. Caso os tornados voltem a ocorrer, a dica, conforme Ferran, é procurar locais com estrutura física sólida. ■

Mais informações:  
Funceme: (85) 3101.1126  
www.funceme.br

Comente  
regional@diariodonordeste.com.br

## ANEXO C – TORNADO DE ITATIRA

## SERTÕES DE CANINDÉ



📍 Tornado que atingiu a região de Lagoa do Mato em Itatira foi do tipo F0, tem ventos de até 117 km/h e é capaz de arrancar pequenas árvores, danificar chaminés e placas FOTO: ANTÔNIO CARLOS ALVES

# Tornado causa medo em moradores de Itatira

📍 População do município de Itatira ficaram assustados com o fenômeno na região de São José dos Guerras

**Itatira.** A exemplo do que ocorreu na Vila do Mineiro, em Jaguaribara, e no município de Senador Pompeu, moradores do Distrito de Lagoa do Mato, em Itatira, distante 219km de Fortaleza, ficaram assustados com a presença de tornados que surgiram da região de São José dos Guerras, em direção à sede do distrito, na última semana.

A professora Marilene Sousa disse que estava assistindo o Jornal Hoje da TV Globo, quando avistou a cena natural que chegou acompanhada de ventos fortes. “Estava acompanhando o caso de Lagoa dos Patos no Rio Grande do Sul, que mostrava uma matéria idêntica ao que vi aqui em Lagoa do Mato. Eles surgiram em três pontos diferentes acompanhados de pontos luminosos e causou medo”, disse a educadora.

## Procurando abrigo

Muitas pessoas que estavam no campo trabalhando ficaram assustadas e trataram de procurar abrigo. O agricultor Francinê Mendes Moreira, que retornava do trabalho em um jumento, depois do cultivo na sua plantação de milho e feijão, na comunidade de Contendas, disse que nunca ti-

nha visto coisa igual. Conforme relatou, ele já tinha tomado conhecimento de tornados pelo rádio, mas “presenciar, uma cena, fria, assustadora e rápida foi a primeira vez”.

## Chuva longa

Os tornados vieram acompanhados de uma chuva longa, raios, trovoadas e muita velocidade. A sensação que se tem é que o tornado chega em alta velocidade, duração da tempestade foi rápida, mas o suficiente para deixar moradores e animais assustados.

Essa é a primeira vez que os habitantes da comunidade de Lagoa do Mato presenciaram uma cena dessa natureza. Se-

## 📍 Os tornados vieram acompanhados de uma chuva longa, raios e trovoadas

gundo a professora Marilene Araújo, que mora na sede do distrito e fotografou a cena, isso só pode ser a revolta da natureza. Para ela, “as pessoas estão agredindo o meio ambiente todos os dias”, criticou.

Quando os tornados passam sobre uma vegetação ou sobre uma construção, como por exemplo uma casa, arrancam pedaços desses locais que passam a carregar junto deles. O

acúmulo de poeira, névoa e destroços é o que dá uma cor escura à coluna de ar que forma o fenômeno.

A força de um tornado é medida pela Escala Fujita, que leva em conta os danos causados por ventos em estruturas e vegetações. Esta escala varia de zero a cinco. Cerca de 70% dos tornados registrados são considerados fracos, sendo classificados como tornados F0 ou F1, segundo a média de velocidade de seus ventos. Apenas 2% deles atingem o máximo de poder de destruição, sendo classificados como tornados F5, cujos os ventos superam os 400km/h.

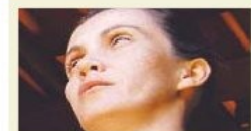
## Variação dos ventos

Um tornado F0, do tipo que aconteceu em Itatira, tem ventos de até 117 km/h e é capaz de arrancar pequenas árvores, danificar chaminés e placas. Um tornado F1 tem ventos que variam de 118 a 179km/h, sendo capaz de causar danos em locais como telhados e também lançar carros fora das estradas.

Os ventos de um tornado F2 ficam entre 180 km/h e 251km/h, causando grandes danos a telhados, virando carros e vagões de carga e ainda lançando objetos leves a pequenas distâncias.

Um tornado F3, que tem ventos entre 252 km/h e 330km/h, pode arrancar árvores de grande porte, arrastar e arremessar carros. Com ventos

## REVOLTA



“Isso só pode ser a revolta da natureza. As pessoas estão agredindo o meio ambiente todo dia”

Marilene Araújo  
Professora

entre 331 e 415km/h, um tornado F4 é capaz de danificar gravemente fundações de casas. Já um tornado do tipo F5 destrói por completo casas e prédios, lança a mais de 100 metros de altura objetos pesados como carros e grandes pedaços de concreto, devido à força dos ventos que variam entre 417 km/h e 508 km/h, sendo o mais perigoso. 📍

## 📍 Mais informações:

Prefeitura do município de Itatira  
Rua Padre José Laurindo, 1249 - Centro  
(88) 3436.1011  
(88) 3436.1039

📍 Comente regional@diariodonordeste.com.br

## ANEXO D - Pseudo-força de Coriolis

A força de Coriolis é uma pseudo-força gerada em referenciais que estão em rotação, ou seja sistemas não inerciais, em relação a um ponto fixo no espaço absoluto.

A nomenclatura pseudo-força é dado para grandezas vetoriais que se comportam idênticamente a forças em referenciais inerciais, ou seja, essas pseudo-forças são chamadas assim por não estar em acordo com os axiomas da Mecânica Clássica.

Para deduzir essa equação tomemos dois sistemas,  $\alpha'$  e  $\alpha$ , um em um ponto fixo absoluto e outro em rotação em relação a origem do sistema  $\alpha'$ .

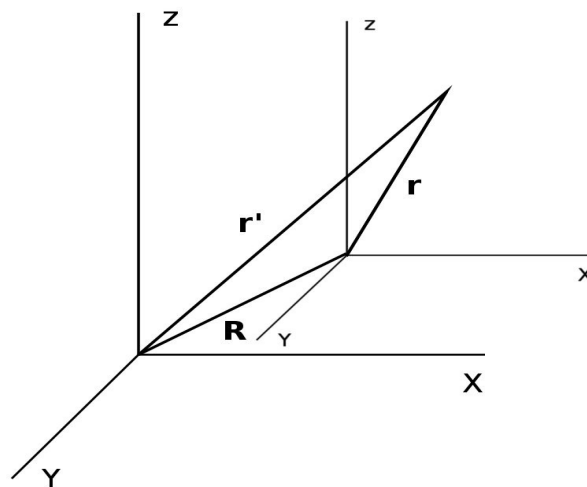


Figura 20 - Representação de coordenadas de um sistema de referências relativo a um absoluto

O vetor posição  $\vec{r}$  configura a posição de um corpo no sistema  $\alpha$ , deste modo o vetor  $\vec{r}'$  representa a posição do mesmo corpo no sistema  $\alpha'$ . Portanto, vetorialmente, podemos representar o vetor resultante em função dos dois sistemas como:

$$\vec{r}' = \vec{R} + \vec{r} \quad (9)$$

Derivando os termos da equação (9) em ambos os lado teremos

$$\dot{\vec{r}}' = \dot{\vec{R}} + \dot{\vec{r}} + \vec{\omega} \times \vec{r} \quad (10)$$

Os termos,  $\dot{\vec{r}} + \vec{\omega} \times \vec{r}$ , do lado direito da equação (10) representam a relação que o sistema  $\alpha$  exerce sobre o sistema  $\alpha'$  devido seu movimento de rotação.

Para encontrar a aceleração basta novamente derivar a equação (10) e teremos.

$$\ddot{\vec{r}}' = \ddot{\vec{R}} + \ddot{\vec{r}} + 2\vec{\omega} \times \dot{\vec{r}} + \dot{\vec{\omega}} \times \vec{r} + \vec{\omega} \times \vec{\omega} \times \vec{r} \quad (11)$$

Uma força atuante no sistema  $\alpha'$  observada do sistema  $\alpha$  pode ser descrita como

$$\vec{F}' = m \ddot{\vec{r}}' = m \ddot{\vec{R}} + m \ddot{\vec{r}} + m 2\vec{\omega} \times \dot{\vec{r}} + m \dot{\vec{\omega}} \times \vec{r} + m \vec{\omega} \times \vec{\omega} \times \vec{r} \quad (12)$$

Essa mesma força sendo observada no sistema  $\alpha$  pode ser reescrita como.

$$\vec{F}_{girante(r')} = \vec{F}_R + \vec{F}'_{fixo(r)} - m 2\vec{\omega} \times \dot{\vec{r}} - m \dot{\vec{\omega}} \times \vec{r} - m \vec{\omega} \times \vec{\omega} \times \vec{r} \quad (13)$$

Para o caso da Terra podemos definir a força,  $\vec{F}'_{fixo}$ , como a força que o campo gravitacional gera, pois, a mesma é uma força que atua no referencial fixo, ou seja, no sistema  $\alpha'$ .

$$\vec{F}'_{fixo} = m \vec{g}_0 \quad (14)$$

Uma particularidade, caso o ponto de origem do sistema fixo seja definido

o centro da terra, pode-se admitir que  $\vec{F}_R \rightarrow 0$ , e como a velocidade angular da terra é aproximadamente constante, pode-se considerar que  $\dot{\vec{\omega}} \rightarrow 0$ . Portanto a equação (13) pode ser reescrita como.

$$\vec{F}_{terra} = m \vec{g}_0 - m \vec{\omega} \times \vec{\omega} \times \vec{r} - m 2 \vec{\omega} \times \dot{\vec{r}} \quad (15)$$

Deste modo a equação (15) mostra a força observada no referencial  $\alpha$ , que para esse caso foi denominado do planeta Terra.

A relação  $\vec{g} = \vec{g}_0 - \vec{\omega} \times \vec{\omega} \times \vec{r}$  é denominada de gravidade efetiva da Terra, e reescrevendo a equação (15), em termos da gravidade efetiva da Terra, temos.

$$\vec{F}_{terra} = m \vec{g} - m 2 \vec{\omega} \times \dot{\vec{r}} \quad (16)$$

O segundo termo a direita da equação (16) é denominado de força de Coriolis dado por.

$$\vec{F}_{Coriolis} = -m 2 \vec{\omega} \times \dot{\vec{r}} \quad (17)$$

A partir de agora será demonstrado que a força de Coriolis exerce uma força de deflexão no movimento de qualquer corpo material na Terra.

Considere que o o vetor velocidade angular da Terra esteja definido no plano como.

$$\vec{\omega} = \dot{\omega} \vec{k} \quad (18)$$

Considere que o vetor velocidade do momento angular da Terra esteja no primeiro quadrante cartesiano  $\vec{j} \times \vec{k}$ , resolvendo  $\vec{\omega} \times \vec{r}$  teremos a seguinte configuração:

$$\omega \times \vec{r} = \begin{pmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ 0 & \omega \cos \phi & \omega \sin \phi \\ \dot{x} & \dot{y} & \dot{z} \end{pmatrix} \quad (19)$$

Resolvendo a multiplicação vetorial da equação (19) temos.

$$\omega \times \vec{r} = \vec{i}(\dot{z} \omega \cos \phi - \dot{y} \omega \sin \phi) + \vec{j}(\dot{x} \omega \sin \phi) - \vec{k}(\dot{x} \omega \cos \phi) \quad (20)$$