

Aspectos Meteorológicos Asociados à Tempestades

Ambiente propício para a formação de tempestades e tempos severos

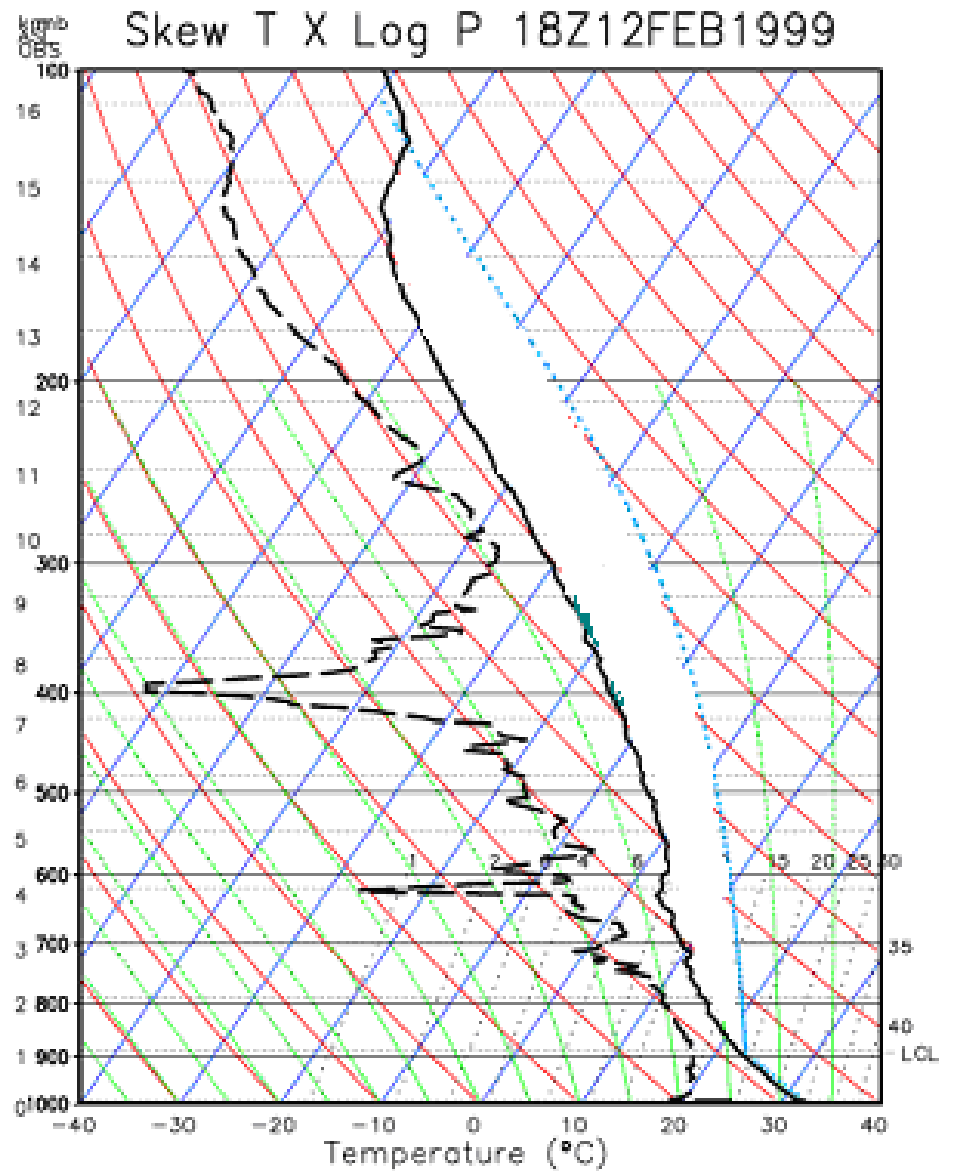
- Empuxo: Energia disponível para o sistema - CAPE;
- Cisalhamento: Cisalhamento vertical do vento para sustentar a severidade da tempestade;
- Mecanismos de formação: movimentos ascendentes do ar;

Empuxo

- A força de empuxo está associada às termas e a formação de nuvens convectivas tipo Cumulus. Esta convecção representa a conversão de energia térmica em cinética, portanto variações verticais temperatura induzem a movimentos verticais.
- Este efeito é mais observado nas camadas mais baixas da atmosfera onde a superfície aquecida libera calor sensível para o ar próximo. Assim, o ar fica mais quente e menos denso, logo ascende
- A partir da teoria da Parcela pode-se estimar a velocidade vertical ou a energia potencial disponível no sistema. De acordo com esta teoria a equação da velocidade vertical de uma parcela pode ser expressa por:

$$u^2 = u_o^2 - 2R' \int_{z_o}^z (T - T') d \ln(p)$$

Analisando o diagrama adiabático, é possível verificar que a velocidade vertical é proporcional a área descrita pela temperatura da parcela subindo (*expansão adiabática ou pseudo adiabática*) e do ar ambiente



$$u^2 = u_o^2 - 2R' \int_{z_o}^z (T - T') d \ln(p)$$

Por outro lado, podemos olhar a mesma equação do ponto de vista da variação da temperatura com a altura. Por exemplo:

$\Gamma = - \frac{dT}{dz}$ variação da temperatura da parcela com a altura

$\gamma = - \frac{dT'}{dz}$ variação da temperatura do ar ambiente com a altura

Aceleração da parcela

$$\frac{dz^2}{dt^2} + \frac{g}{T_0} (\Gamma - \gamma) z = 0$$

$$\frac{dz^2}{dt^2} + \frac{g}{T_0} (\Gamma - \gamma) z = 0$$

a) $\Gamma - \gamma > 0$ (lapse rate da temperatura da parcela é maior que o do ambiente) **Caso estável:** a parcela não abandona seu nível original ou pode descer a um nível neutro.

b) $\Gamma - \gamma < 0$ (lapse rate da temperatura da parcela é menor que o do ambiente) **Caso “instável”,** parcela sai do seu nível original e nunca mais retorna a ele.

c) $\Gamma - \gamma = 0$ (lapse rate da temperatura da parcela é igual ao do ambiente) **Caso “neutro”:** a parcela pode sair do seu nível original e nunca mais retorna a ele, porém, sem aceleração.

Porém como estamos lidando com nuvens, isto é, parcelas de ar saturadas ($UR \geq 100\%$), utilizamos a instabilidade condicional, ou seja: $\Gamma_s - \gamma < 0$

Índices de associados às tempestades:

Índice de Levantamento (LI)

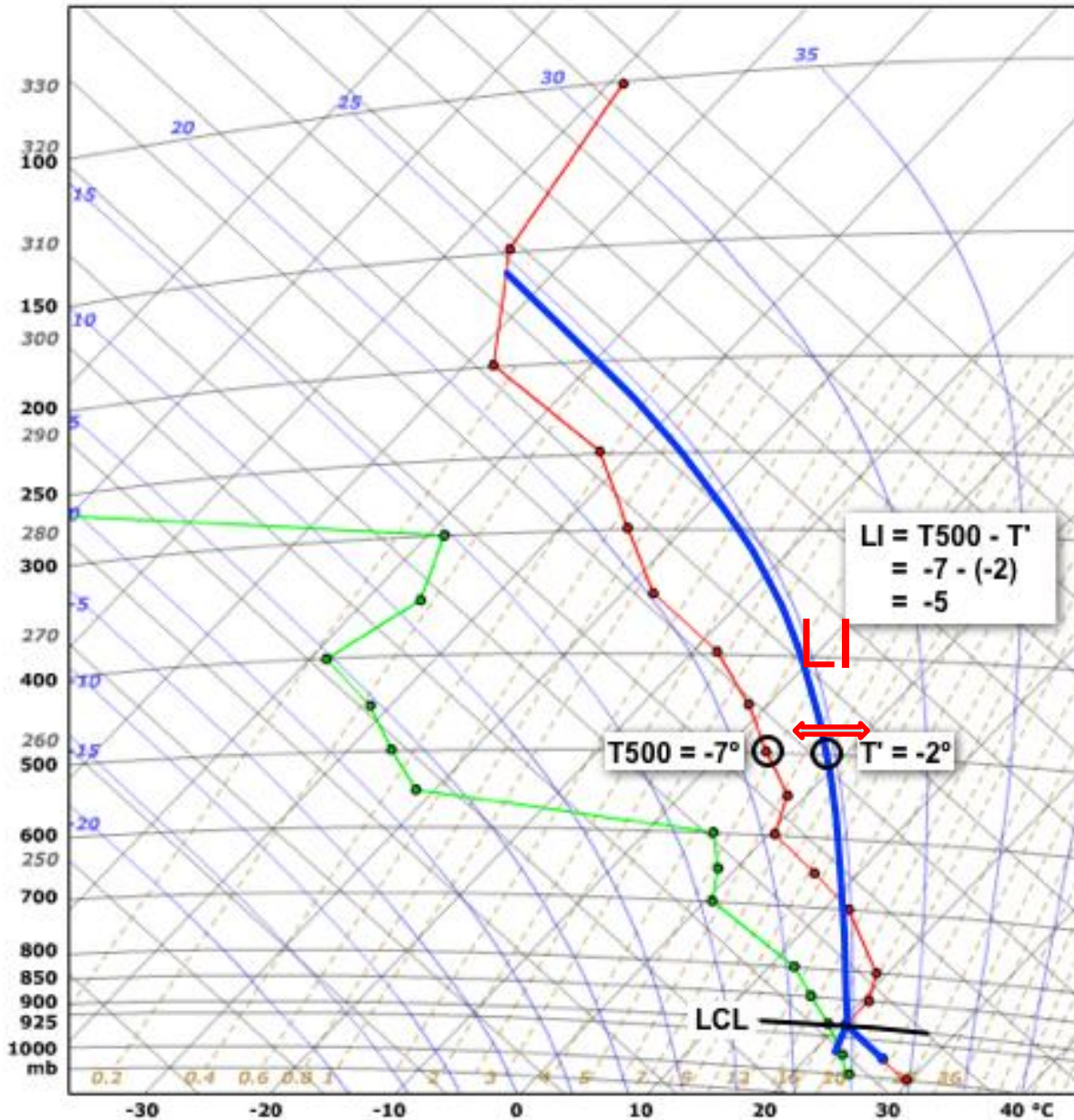
$$LI = T_{AR} [500 \text{ mb}] - T_{Parcela} [500 \text{ mb}]$$

T_{ar} → temperatura do ar em 500 mb;

T_{parcela} → temperatura da parcela teria se sofresse um levantamento adiabático até o Nível de Condensação por Levantamento (NCL) e depois adiabático úmido até o nível de 500 mb

- LI > 0°C → Sem Tempestades
- 0 ≤ LI < - 4°C → Com Tempestades
- LI ≤ - 4°C → Com Tempestades severas

Determination of the Lifted Index (LI)



LI	Condições
$> 0^{\circ}\text{C}$	Sem tempestades
0 e -4°C	Com tempestades
$\leq -4^{\circ}\text{C}$	Com tempestades severas

Índice de Showalter (SI)

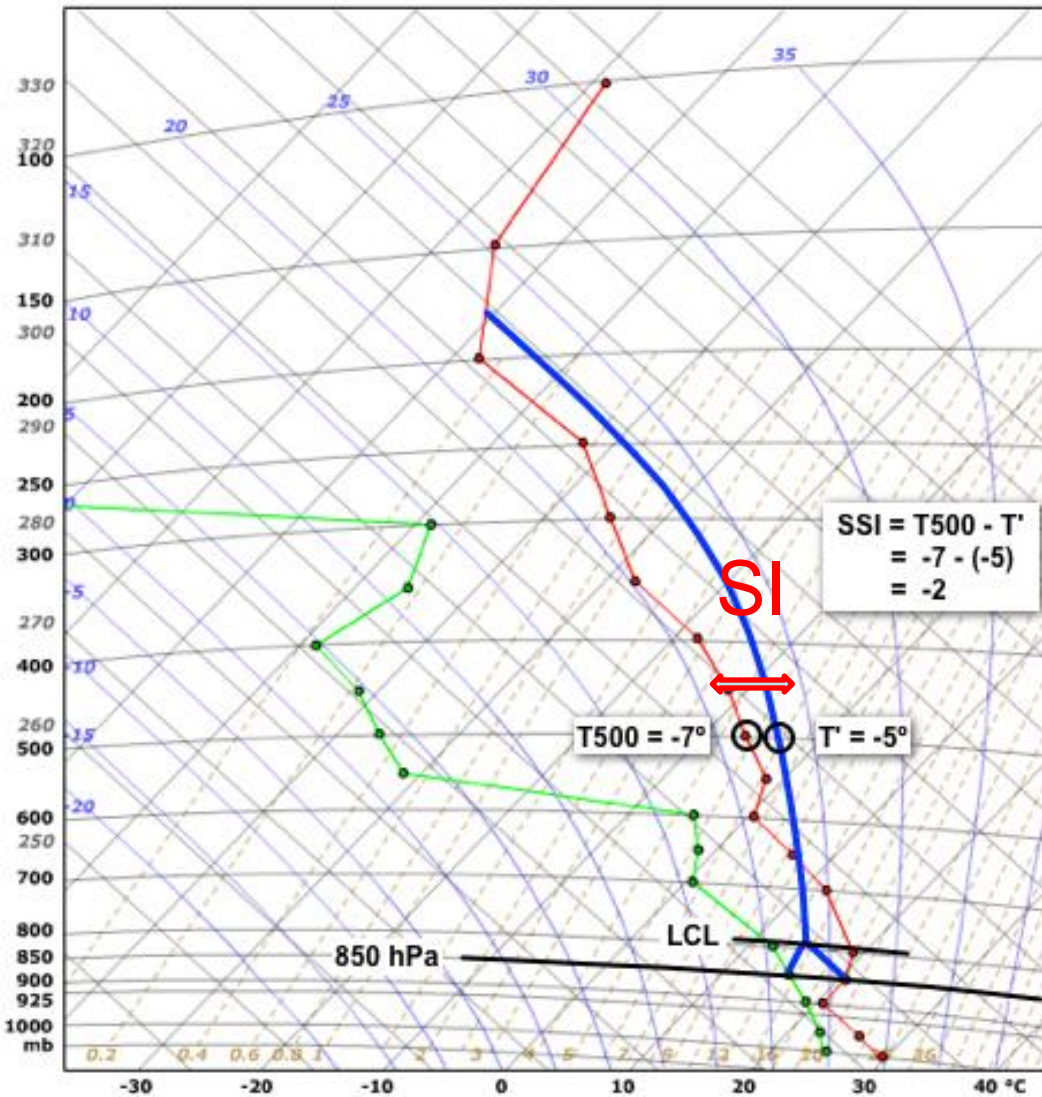
$$SI = T_{AR} [500 \text{ mb}] - T_{Parcela} [500 \text{ mb}]$$

T_{ar} → temperatura do ar em 500 mb;

T_{parcela} → temperatura da parcela teria se sofresse um levantamento adiabático seco a partir de 850 mb até o NCL e então adiabático úmido até 500 mb

SI	Condições Observadas
+3 a +1	Chuva e algumas tempestades
+1 a -2	Tempestades
-3 a -6	Tempestades Severas
< -6	Tempestades Severas e probabilidade de Tornado

Determination of Showalter Stability Index (SSI)



©The COMET Program

SI	Condições Observadas
+3 a +1	Chuva e algumas tempestades
+1 a -2	Tempestades
-3 a -6	Tempestades Severas
< -6	Tempestades Severas e probabilidade de Tornado

Índice de TOTAL-TOTALS (TT)

$$TT = T_{d850} + T_{850} - 2xT_{500}$$

T_{d850} → temperatura do ponto de orvalho em 850 mb;

T_{850} → temperatura do ar em 850 mb;

T_{500} → temperatura do ar em 500 mb;

Ou ainda:

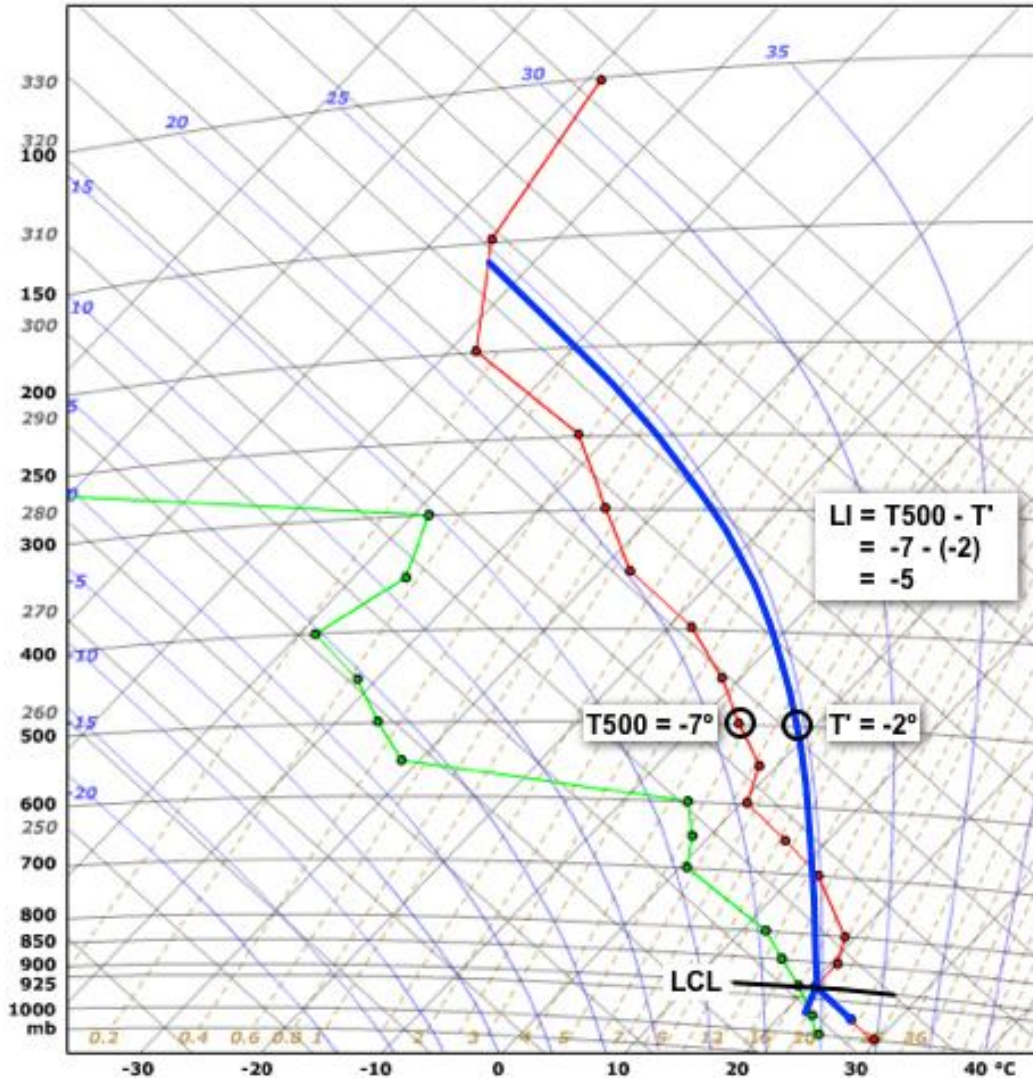
$$TT = \{T_{d850} - T_{500}\}_{cross-total} + \{T_{850} - T_{500}\}_{vertical-total}$$

Cross-total é uma medida de quão forte é o empuxo de uma parcela de ar menos densa proveniente de ar úmido de baixos níveis

Vertical-total é a medida de quão forte é o empuxo de uma parcela de ar devido ao ar úmido em baixos níveis.

$$TT = \{T_{d\ 850} - T_{500}\}_{cross-total} + \{T_{850} - T_{500}\}_{vertical-total}$$

Determination of the Lifted Index (LI)



©The COMET Program

Total

Condições

TT < 44

Pouco
possibilidade de
convecção

44 < TT < 50

Possíveis
tempestades

51 < TT < 52

Tempestades
severas isoladas

53 < TT < 56

Tempestades
severas
distribuídas

TT > 56

Tempestades
severas
espalhadas

Índice K (°C)

$$IT = T_{850} - T_{500} + T_{d850} - \{T_{700} - T_{d700}\}$$

T_{d850} → temperatura do ponto de orvalho em 850 mb;

T_{850} → temperatura do ar em 850 mb;

T_{500} → temperatura do ar em 500 mb;

T_{d700} → temperatura do ponto de orvalho em 700 mb;

T_{700} → temperatura do ar em 700 mb;

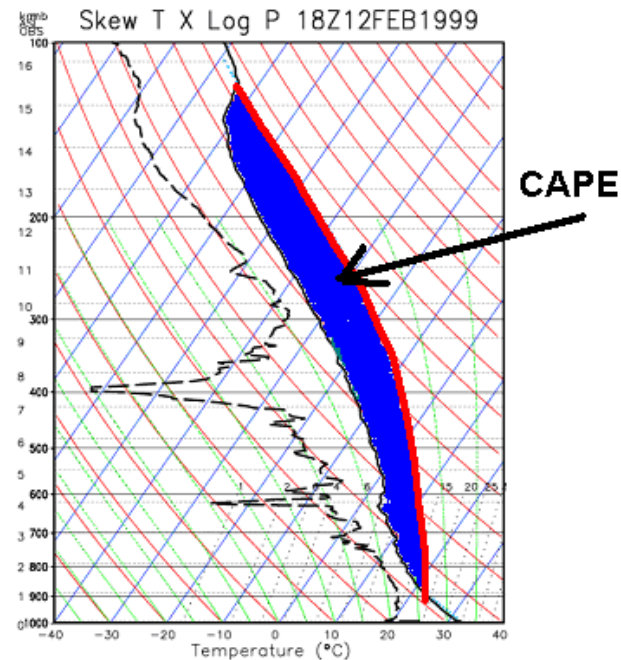
O índice K foi derivado para prever tempestades de massas de ar, ou tempestades sem mecanismos dinâmicos de levantamento do ar.

Grandes diferenças de Td indicam alto nível de umidade em baixos níveis, o que aumenta a convecção. Já para pequenas diferenças de Td em 700 hPa isso é um indicativo de convecção profunda.

<i>K(intervalo)</i>	<i>Probabilidade de Tempestades (%)</i>
$K \leq 15$	0
$15 < K \leq 21$	20
$21 < K \leq 26$	20-40
$26 < K \leq 31$	40-60
$31 < K \leq 36$	60-80
$36 < K \leq 40$	80-90
$K > 40$	~100

CAPE (Energia Pontencial Convectiva Disponível)

O CAPE é uma medida em unidade de trabalho por unidade de massa e representa a energia potencial por quilograma de ar que a parcela tem, ou ainda, a energia que seria gasta se a parcela fosse levantada após o NCL por convecção.



$$CAPE = R' \int_{P_{ncl}}^{P_{ne}} \frac{T_{parcela}(p) - T_{ar}(p)}{p'} dp$$

CAPE < 1000 J/kg → Convecção Fraca

1000 < CAPE < 2500 J/kg → Convecção Moderada

CAPE > 2500 J/kg → Convecção Forte

CINE (Energia de Inibição Convectiva)

O Cine (J/kg) é uma medida de como não haveria o desenvolvimento de tempestades, ou a sua inibição. Podemos dizer que é a energia mínima necessária para que as tempestades se desenvolvam. Assim o CINE representa a energia a qual deve ser aplicada para que o mecanismo de levantamento ou aquecimento da superfície inicie o desenvolvimento de tempestades.

$$CINE = R' \int_{P_{sfcl}}^{P_{ncl}} \frac{T_{parcela}(p) - T_{ar}(p)}{p'} dp$$

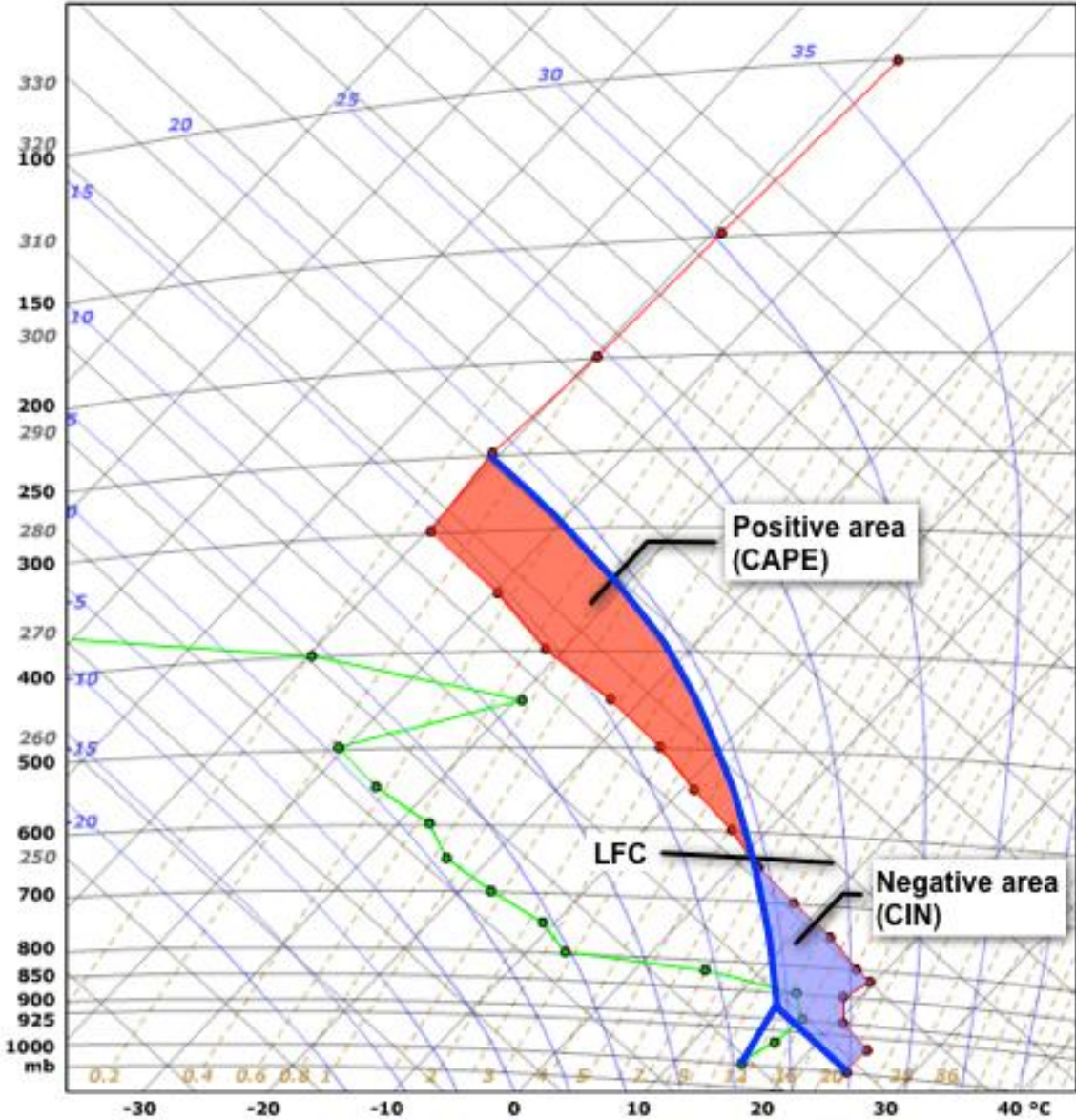
CINE < 15 → Cumulus de bom tempo

15 < CINE < 50 → pode formar algumas tempestades

50 < CINE < 150 → linhas de instabilidades fortes com tempestades

150 < CINE < 500 → forte inversão, sem probabilidade de desenvolvimento de tempestades.

Sounding Showing CIN and CAPE



SWEAT

$$SWEAT = [12 \times D]_A + [20 \times \{TT - 49\}]_B + [2 \times V_{850} + V_{500} + 125 \times \{S + 0,2\}]_C$$

$D \rightarrow Td(850mb)(^{\circ}C)$, se $Td < 0^{\circ}C \rightarrow D = 0^{\circ}C$

TT índice de total-totals

$V_{850} \rightarrow$ velocidade do vento em 850 mb em nós

$V_{500} \rightarrow$ velocidade do vento em 500 mb em nós

$S \rightarrow$ seno da direção do vento em 300 mb

Se $TT < 49$, não utilizar o termo C

$$125 \times (S + 0,2) = 0$$

**Quando direção do vento em 850 mb for entre 130 e 230,
direção do vento em 500 mb for entre 210-310 graus**

$(Td_{500} - Td_{850}) > 0$,

$V_{850} < 15$ nós e $V_{500} < 15$ nós

$SWEAT > 300 \rightarrow$ Possíveis tempestades severas

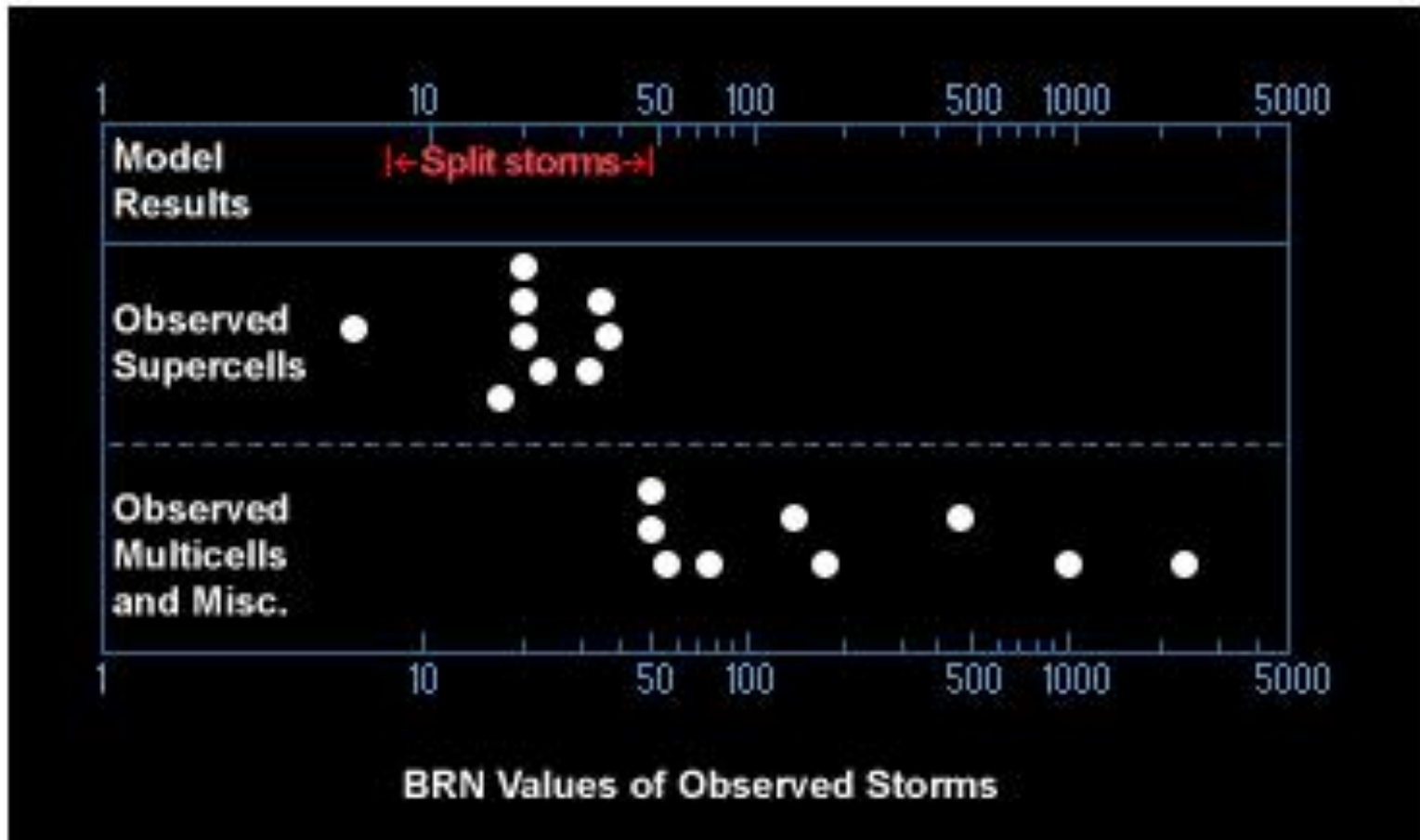
$SWEAT > 400 \rightarrow$ Possíveis tempestades severas com tornados

Bulk Richardson Number (BRN)

- O BRN é a razão entre o CAPE e cisalhamento vertical do vento na atmosfera.

A magnitude do movimento vertical esta associado com o CAPE, enquanto que a estrutura da tempestade esta relacionada com o cisalhamento vertical

$$BRN = \frac{CAPE}{\left[0,5 \left(u_{6\text{ km}} - u_{500\text{ m}}\right)^2\right]}$$



$$BRN = \frac{CAPE}{\left[0,5 \left(u_{6 km} - u_{500 m}\right)^2\right]}$$

Adapted from Weisman and Klemp, 1982

CISALHAMENTO DO VENTO

Variação da velocidade ou direção do vento com a altura são essenciais para manter e intensificar as tempestades. Além disso é a fonte primária para os tornados.

SREH (Helecidade Ambiental Relativa de Tempestades) indica se o ambiente esta favorável a desenvolver tempestades com correntes ascendentes com rotação.

$$SREH = - \int_0^h k \cdot (V - c) \times \frac{dV}{dz} dz$$

h → espessura do ar entornado

c → vetor deslocamento da tempestade

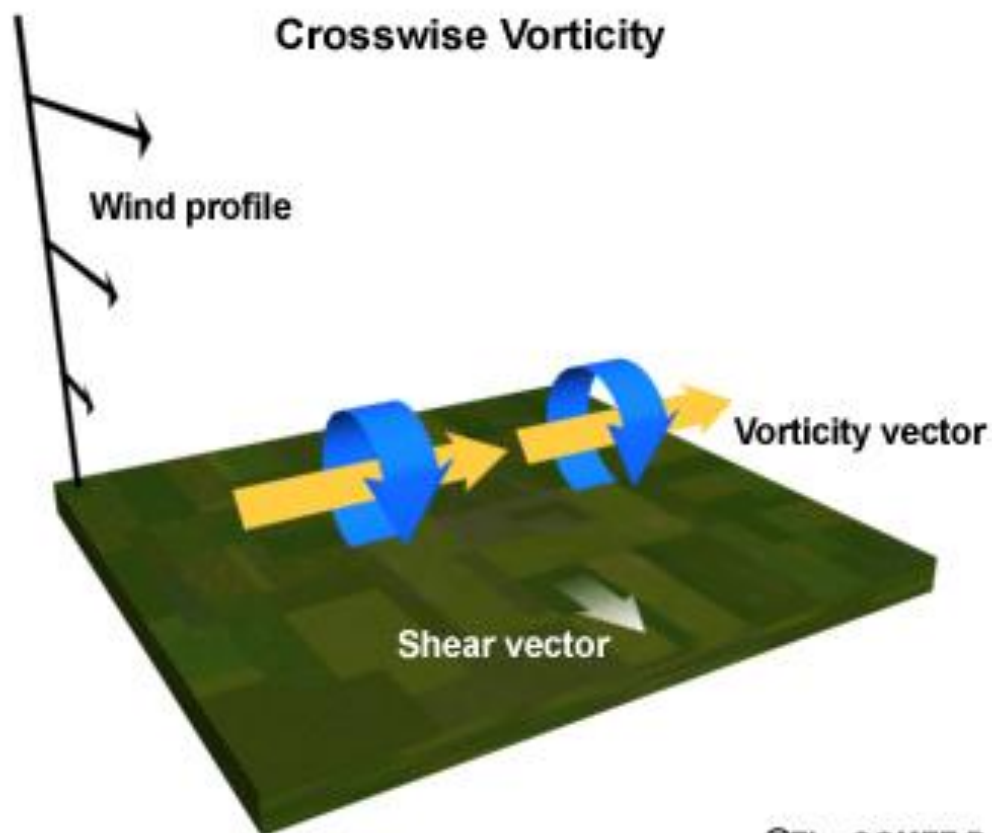
v → vetor vento

k → vetor unitário vertical

A vorticidade horizontal frequentemente gera cisalhamento vertical do vento.

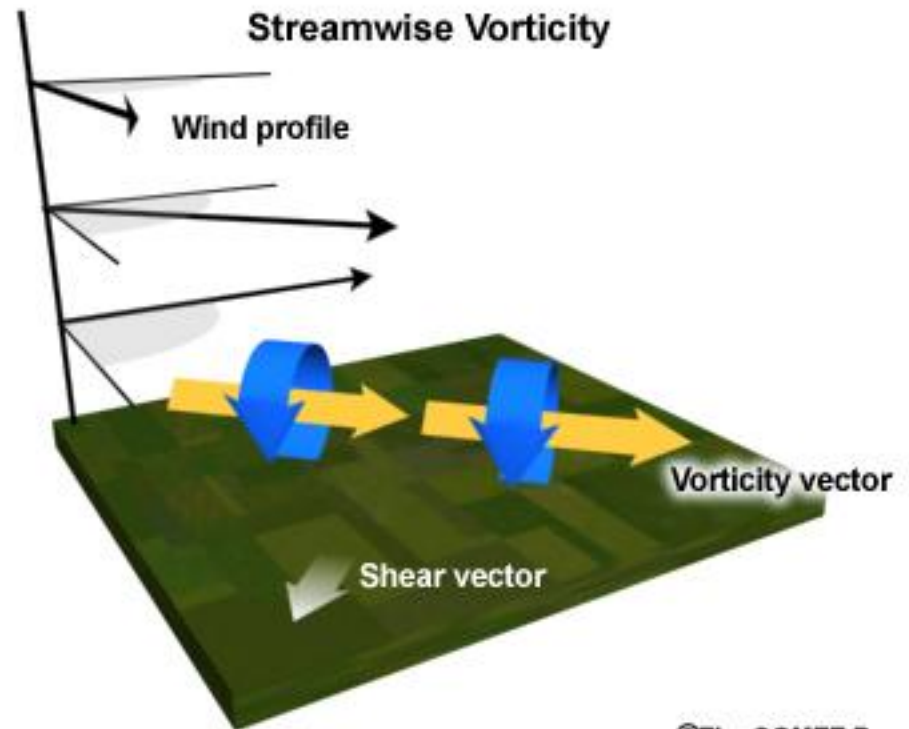
Um perfil vertical do vento que tem direção cte mas tem velocidade aumentando com a altura, cria um cisalhamento paralelo a direção do vento.

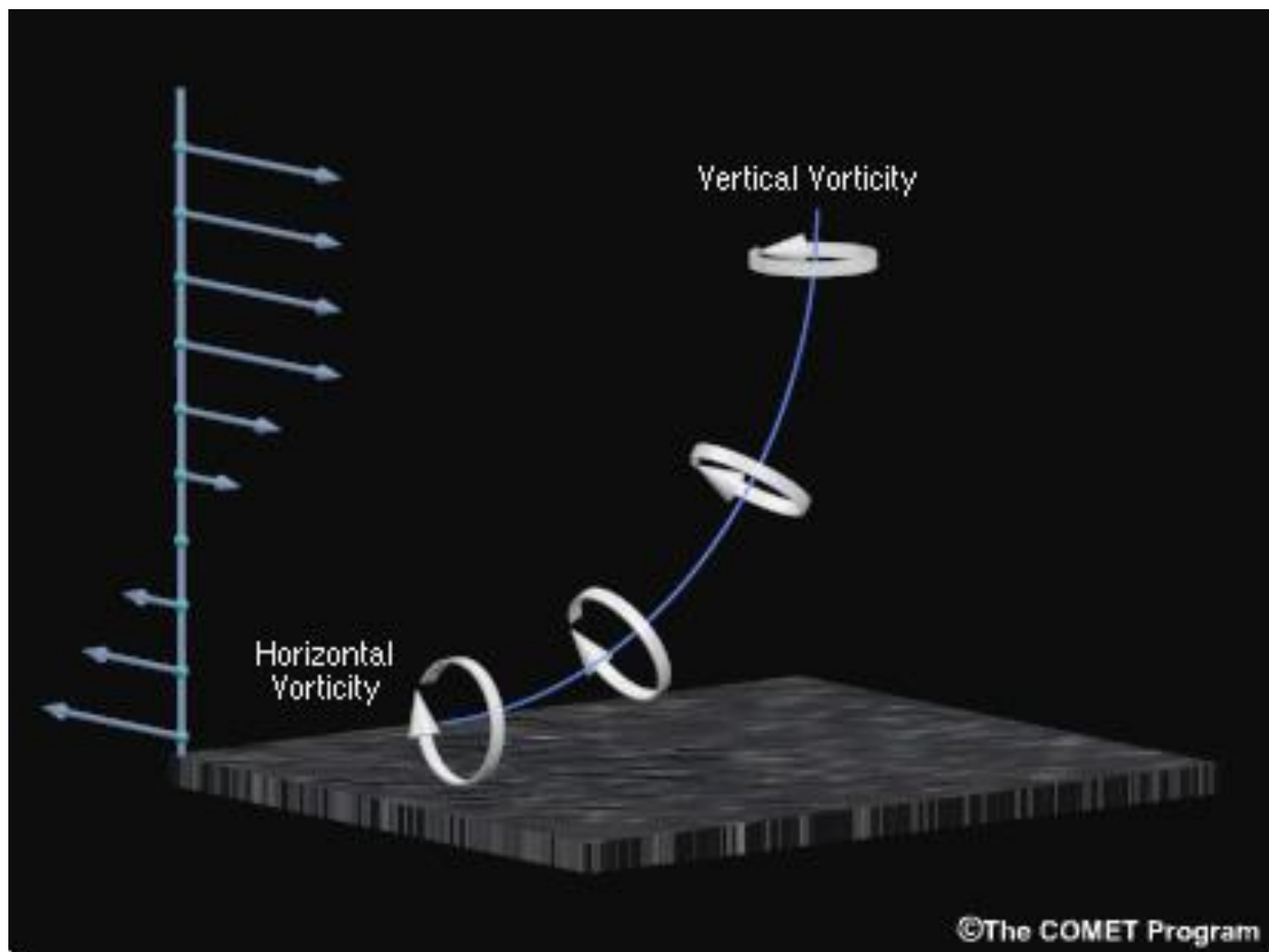
Este cisalhamento resulta em uma vorticidade horizontal que é perpendicular a direção do vento (crosswise vorticity)



Perfil vertical com intensidade cte com a altura mas direção diferente cria um cisalhamento que é perpendicular com o vento médio.

A vorticidade resultante é paralela ao vento médio (**streamwise vorticity**)





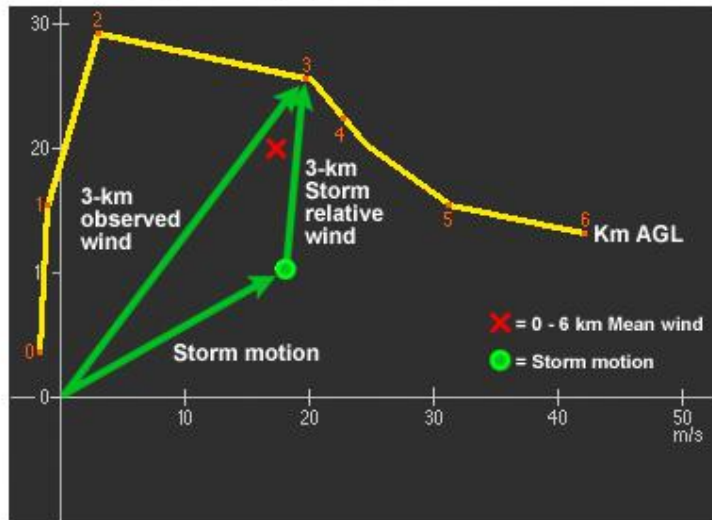
Graficamente o SREH é a área circunscrita na hodógrafa de 0-60 km que representa o vetor de movimento das tempestades (em geral o nível de 700 hPa, 3-4 km) subtraído: $(u, v) - \frac{\rho}{\sigma}$

SREH > 150 → Tempestade rolando

SREH > 300 → Possível super-célula

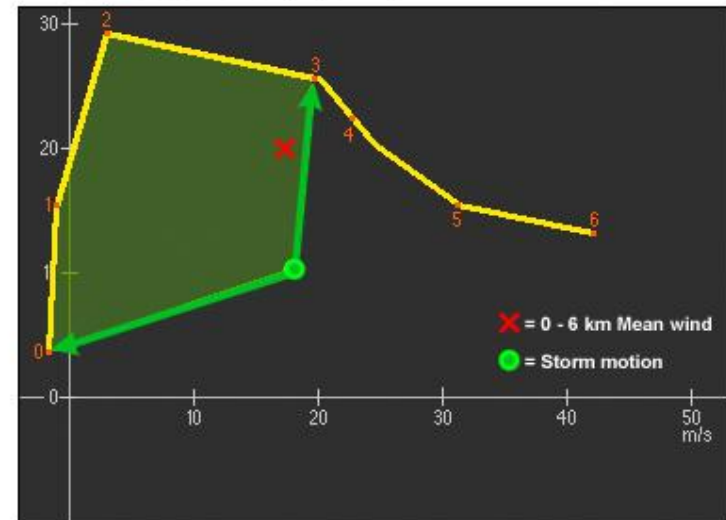
SREH > 450 → Possível super-célula com tornado

Hodograph Determination of Storm Relative Environmental Helicity (SREH)



©The COMET Program

Hodograph Determination of Storm Relative Environmental Helicity (SREH)



©The COMET Program

A rotação com a altura provoca uma componente de vorticidade horizontal que pode ser convertida em vorticidade vertical em eventos de convecção.

Assim a corrente ascendente da tempestade fará uma rotação a medida que sobe, formando um fluxo helicoidal e favorecendo a formação de tornados.

Ernani L. Nascimento: PREVISÃO DE TEMPESTADES SEVERAS UTILIZANDO-SE PARÂMETROS CONVECTIVOS E MODELOS DE MESOESCALA: Revista Brasileira de Meteorologia, Vol. 20, n.1, 121-140, Abril / 2005

PREVISÃO DE RAIOS EM MODELO NUMÉRICO DE PREVISÃO DO TEMPO

$$LPI = \frac{1}{\text{volume}} \int \int \int \varepsilon \omega^2 dx dy dz$$

Lightning Potential Index é volume integrado do fluxo total de gelo e água entre as “*regiões de carregamento elétrico (0 e -20°C)*”, observado durante o desenvolvimento das tempestades elétricas.

ε - fator de escala e ω - velocidade vertical

Lynn B, Yair Y. Prediction of lightning flash density with the WRF model. Advances in Geosciences. 2010 Feb 17;23:11-6.

Fator de escala da velocidade vertical da nuvem (**w**) que utiliza a razão de mistura Total máxima de água super-resfriada (**QI**) e diferentes tipos de gelo (**Qi**) dentro um volume.

$$\varepsilon = 2 \frac{\sqrt{Q_{\text{gelo}} Q_{\text{liquido}}}}{(Q_{\text{gelo}} + Q_{\text{liquido}})}$$

Razão de mistura Total de Gelo

$$Q_{\text{gelo}} = q_{\text{graupel}} \left[\frac{\sqrt{q_{\text{neve}} q_{\text{graupel}}}}{(q_{\text{neve}} + q_{\text{graupel}})} + \frac{\sqrt{q_{\text{gelo}} q_{\text{graupel}}}}{(q_{\text{gelo}} + q_{\text{graupel}})} \right]$$

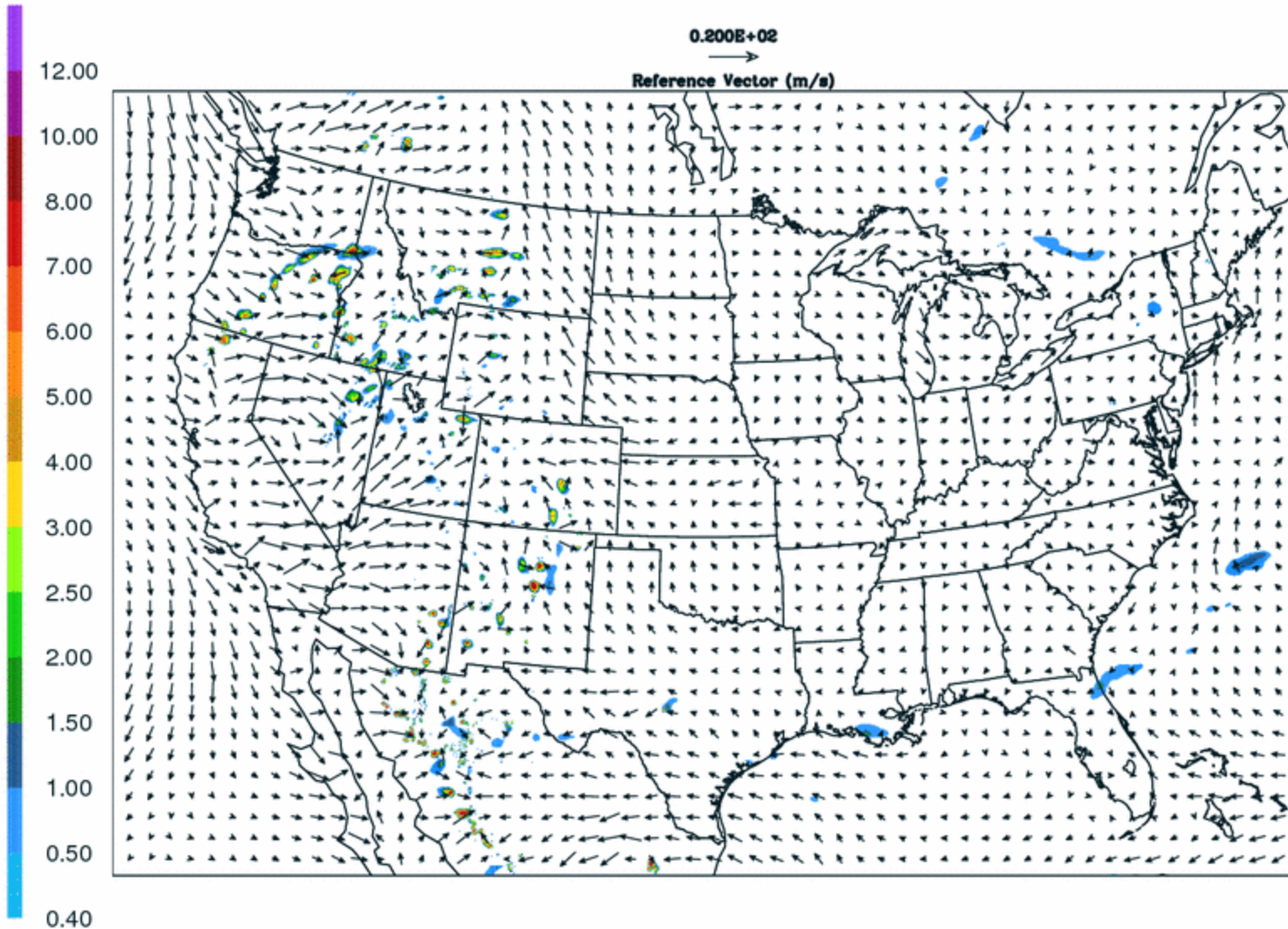
Razão de mistura Total de Água = QI

e q é a razão de mistura de cada tipo de hidrometeoro

MaxLtg2, 10m WIND
Max Value = 11.8
VALID 01Z 27 JUN 17

NSSL Realtime WRF
01-H FCST
4.0 KM LMB CON GRD

http://wrf.nssl.noaa.gov/ltg2_loop.html



Lista de Exercício - Aula Prática 4

Vamos identificar qual índice consegue descrever a ocorrência das Tempestades elétricas no Brasil.

- 1) Usando os dados diários do RaiosOnline, vamos identificar um dia com bastante atividade elétrica.

<http://raiosonline.iag.usp.br>

- 2) Depois vamos no portal de raios sondas e baixamos os dados de índices meteorológicos e calculamos.

<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>

LI	Condições
> 0°C	Sem tempestades
0 e -4°C	Tempestades
≤ -4°C	tempestades severas

K	Probabilidade de Tempestades (%)
$K \leq 15$	0
$15 < K \leq 21$	20
$21 < K \leq 26$	20-40
$26 < K \leq 31$	40-60
$31 < K \leq 36$	60-80
$36 < K \leq 40$	80-90
$K > 40$	~100

Total	Condições
TT < 44	Pouco possibilidade de convecção
44 < TT < 50	Possíveis tempestades
51 < TT < 52	Tempestades severas isoladas
53 < TT < 56	Tempestades severas distribuídas
TT > 56	Tempestades severas espalhadas

SWEAT	Condições
> 300	<i>tempestades severas</i>
> 400	<i>tempestades severas com tornados</i>

CAPE (J/kg)	Convecção
< 1000	Fraca
1000-2500	Moderada
> 2500	Forte

SI	Condições Observadas
+3 a +1	Chuva e algumas tempestades
+1 a -2	Tempestades
-3 a -6	Tempestades Severas
< -6	Tempestades Severas e probabilidade de Tornado

CINE (J/kg)	Condições
< 15	Cumulus de bom tempo
15-50	pode formar algumas tempestades
50-150	linhas de instabilidades fortes com tempestades
150-500	Sem probabilidade de tempestades