

FÍSICA DAS TEMPESTADES DE GRANIZO EM SÃO PAULO

Estella da Silva Jesus^{1*}, Ricardo Hallak²

1. Estudante do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG- USP)
2. Professor Dr. do IAG-USP - Departamento de Ciências Atmosféricas/Orientador

Resumo

Granizo é um dos fenômenos meteorológicos intrigantes que tem desafiado os meteorologistas ao longo do tempo. Sua ocorrência costuma causar uma série de problemas à população. Este projeto estuda a estrutura tridimensional das tempestades associadas à queda de granizo observadas em duas regiões da Região Metropolitana de São Paulo. A metodologia baseia-se na análise diagnóstica física e na estatística de variados índices de instabilidade atmosférica obtidos com dados medidos por radiossondas, com o objetivo de quantificar a importância e influência de cada um deles na dinâmica da evolução desses fenômenos convectivos no tempo. Pretende-se responder por que alguns casos em que há condições atmosféricas favoráveis ao desenvolvimento dessas tempestades observa-se granizo à superfície e, em muitos outros casos similares, não. Os resultados indicam que, na maior parte dos casos, observa-se a atuação de uma única nuvem cumulonimbus isolada, que é mais vigorosa que as tempestades comuns.

Palavras-chave: convecção atmosférica; meteorologia de mesoescala; estabilidade atmosférica.

Apoio financeiro: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Trabalho selecionado para a JNIC: Pró-reitoria de Pesquisa da USP.

Introdução

A queda de granizo à superfície é frequentemente causa de prejuízos materiais em todo o mundo. Alguns exemplos são os danos causados principalmente em automóveis, aeronaves, produção agrícola (como a perda de folhagens de consumo humano e frutas), telhados e estruturas de vidro, entre outros. Somente nos EUA, os prejuízos anuais com a queda de granizo atinge a casa do bilhão de dólares (Cintineo et al. 2002).

Martins et al. (2017) realizaram um levantamento estatístico sobre locais e frequências de tempestades severas de granizo na América do Sul. Para uma sequência natural desse trabalho, é de interesse a investigação científica mais profunda das características físicas tridimensionais de sistemas convectivos geradores de granizo à superfície, abordando sua origem, desenvolvimento, ciclo de vida, formas de propagação e severidade, buscando-se possíveis padrões de recorrência. Este projeto se utiliza de conjuntos de medidas obtidas rotineiramente pelas redes de estações meteorológicas brasileiras e outras fontes de dados como, por exemplo, imagens de satélite, para o estudo de eventos de queda de granizo em superfície na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP).

O objetivo geral deste projeto é levantar um conjunto de indicadores de severidade convectiva para a RMSP associados à formação de granizo e quantificar a importância e influência de cada um deles por meio da investigação da física da instabilidade termodinâmica, da cinemática, e da dinâmica da evolução dos sistemas convectivos no tempo. Pretende-se responder por que alguns casos em que há condições atmosféricas favoráveis ao desenvolvimento de tempestades na RMSP observa-se granizo à superfície e, em muitos outros casos similares, não. Ressalta-se, ainda, a especial atenção na identificação do modo convectivo, isto é, se o tipo de sistema convectivo gerador de granizo à superfície em cada caso se apresenta de forma isolada ou aglomerada. Em adição, objetiva-se aplicar métodos estatísticos aos conjuntos de valores de índices de instabilidade atmosférica na busca de possíveis padrões que possam ser associados à física desses fenômenos e à sua probabilidade de ocorrência.

Metodologia

Dispõe-se de imagens em vários canais do novo satélite geoestacionário GOES-16 (imagens coloridas) e de gerações GOES mais antigas (apenas em tons de cinza) do portal do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, radiossondagens do aeródromo de Campo de Marte em São Paulo (portal da Universidade de Wyoming-EUA) e medidas METAR da estação meteorológica de superfície do Campo de Marte (portal REDEMET da Aeronáutica). As diversas análises realizadas nesta pesquisa fazem uso de programação científica a partir de linguagens de programação de alto nível, como FORTRAN90 e Python, em plataforma LINUX, além de visualização gráfica por pacotes diversos.

Para cada um dos casos observados de granizo à superfície entre os anos de 2003 e 2018 no aeródromo de Campo de Marte e no Parque CIENTEC, num total de 28 casos, foram analisadas as imagens de diversas gerações dos satélites geoestacionários GOES e os perfis verticais de temperatura do ar, temperatura do ponto de orvalho (umidade do ar) e vento obtidos pelas radiossondagens. Nas imagens de satélite no canal infravermelho, os valores dos pixels indicam a temperatura de brilho, algo próximo à temperatura real. Cores quentes, que tendem ao amarelo, laranja e vermelho, indicam maior temperatura de brilho, enquanto cores frias

(tendendo ao azul e verde), indicam temperaturas mais frias (e estão associadas ao topo de nuvens). O GOES16 fornece imagens dos canais de vapor d'água em 3 diferentes canais: o canal 8 corresponde aos níveis troposféricos mais altos; o canal 9, os níveis médios; e o canal 10, os níveis baixos. Havendo vapor d'água em alguns desses níveis, o pixel correspondente aparecerá na cor azul, branca ou verdes nestas imagens. Ausência de nuvens é indicada na cor amarela, laranja e, raramente, em vermelho.

Para o cálculo e análise diagnóstica de alguns índices de instabilidade, as sondagens pontuais verticais da atmosfera foram digitalmente plotadas em diagramas termodinâmicos do tipo SkewT-LogP por meio de programação Python. Os índices termodinâmicos de interesse para o estudo de tempestades convectivas com geração e queda de granizo à superfície são, segundo Punge e Kunz (2016), CAPE (Convective Available Potential Energy - Energia Potencial Disponível para Convecção), CINE (Convective Inhibition Energy - Energia de Inibição de Convecção) e Índice de Levantamento (IL). O CAPE e CINE têm unidades de energia por unidade de massa (J kg^{-1}), enquanto o IL tem unidades de $^{\circ}\text{C}$, embora geralmente seja indicado de forma adimensional. As formulações para esses índices são encontradas, por exemplo, em Doswell e Schultz (2006). Pelo mesmo diagrama, estima-se a altura da base de nuvem em relação à superfície pelo cálculo do Nível de Condensação por Levantamento (NCL). Pela inspeção visual dos diagramas, verifica-se o perfil vertical do vento e se há ou não a presença do Jato de Altos Níveis (JAN), que sopra de oeste.

Resultados e Discussão

Inicialmente, constatou-se que a maioria dos casos do Aeródromo de Campo de Marte estão associados com convecção úmida profunda atuando de forma isolada exatamente sobre a RMSP, apresentando topo com nuvens cirros de aspecto circular em 8 dos 13 eventos. Nestes casos, verifica-se a presença de uma única célula cumulonimbos intensa. Como exemplo para estes casos, a Figura 1a mostra a imagem do canal infravermelho do novo satélite GOES16, onde são identificadas células convectivas atingindo altos níveis da troposfera. As Figuras 1b a 1d provêm dos canais de vapor d'água do mesmo satélite e mostram três diferentes níveis troposféricos: altos, médios e baixos, respectivamente. Esta dissecação vertical da nuvem convectiva mostra que a corrente de ar ascendente no interior da nuvem é intensa. A célula convectiva de interesse corresponde a uma nuvem cumulonimbos isolada, que apresenta formato circular e está destacada pelo círculo vermelho na Figura 1b. Apesar de ter aparência muito pequena nessas imagens, o diâmetro do topo dessa nuvem é estimado em aproximadamente 30 km em extensão horizontal.

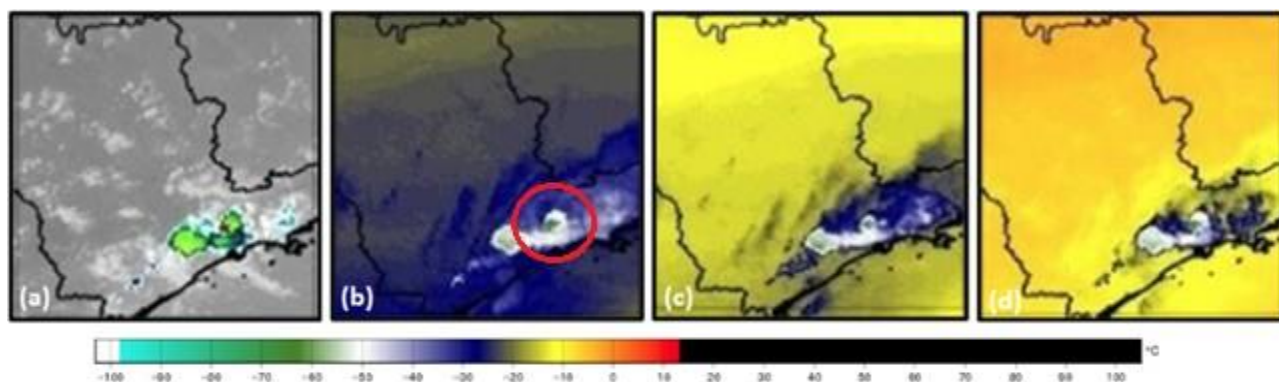


Figura 1: Imagens de alta resolução do novo satélite GOES-16 para 12/03/2018 às 2000 UTC no (a) canal do infravermelho; (b) canal do vapor d'água altos níveis; (o círculo vermelho destaca a célula convectiva isolada) c) canal do vapor d'água em médios níveis; (d) canal do vapor d'água em baixos níveis. A barra de cores indica a temperatura de brilho do pixel em $^{\circ}\text{C}$.

Os índices de instabilidade indicam a probabilidade de ocorrência e a possível severidade das tempestades que venham a se formar no decorrer do dia (Weisman e Klemp 1986). Por exemplo, o Índice de Levantamento é a diferença de temperatura entre o ar ambiente no nível isobárico de 500 hPa e uma parcela de ar levantada adiabaticamente a partir de 850 hPa até o nível isobárico de 500 hPa. Quanto mais negativo o valor de IL, maior é a ameaça de mau tempo. Dez dos 13 casos de Campo de Marte apresentam IL entre $-4,0^{\circ}\text{C}$ e $-7,1^{\circ}\text{C}$, indicando forte potencial para o desenvolvimento de tempestades severas na RMSP. O CAPE proporciona uma estimativa da máxima energia cinética possível que uma parcela estaticamente estável pode adquirir, assumindo-se que esta ascende em processo adiabático (Punge e Kunz 2016). Portanto, quanto maior o valor de CAPE, mais intensa a corrente ascendente e mais severa a tempestade. Numa sondagem atmosférica plotada no diagrama termodinâmico SkewT-logP, como a do exemplo da Figura 2 para 05/12/2013, o valor de CAPE é correspondente à área do diagrama sombreada em cinza claro. A Tabela 1 mostra que 10 dos 13 eventos apresentam $\text{CAPE} > 1000 \text{ J kg}^{-1}$. CINE representa o trabalho necessário para se elevar uma parcela de ar da superfície até seu nível de convecção espontânea, e está sombreado em cinza escuro na Figura 2. A partir do nível de convecção espontânea, as parcelas de ar sobem espontaneamente na atmosfera, configurando, então, a corrente de ar ascendente no interior das nuvens. A presença de CINE nas sondagens é favorável à maior intensidade das tempestades de verão, pois há condições para que a energia CAPE cresça ao longo do dia em vista do aquecimento diurno da superfície. O disparo da convecção ocorre, geralmente, a partir do meio da tarde na RMSP durante os meses quentes do ano. A Tabela 1, onde se observa que vários

dos casos estão associados com $CINE < -70 \text{ J kg}^{-1}$, condensa os resultados da pesquisa para o Campo de Marte. Nela, constata-se também que 6 dos 12 casos apresentam base de nuvem abaixo do nível de 870 hPa (cerca de 1300 m acima da superfície), o que pode ser considerado como uma base bastante baixa, pois a média da base de nuvens é em torno de 2000 m na RMSP, o que corresponde aproximadamente a 800 hPa.

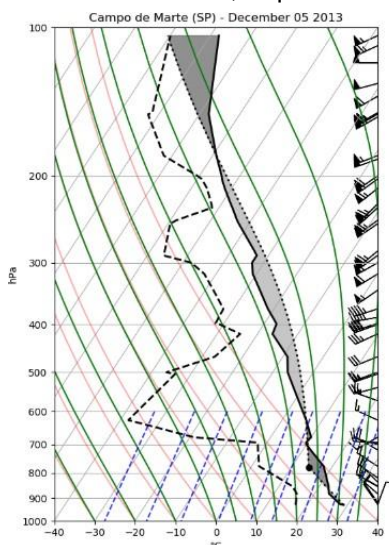


Figura 2: Diagrama termodinâmico SkewT-LogP para a sondagem das 1200 UTC de 05/12/2013. Curva tracejada: temperatura do ponto de orvalho; curva sólida: temperatura do ar; área sombreada em cinza claro: CAPE ($= 1227 \text{ J kg}^{-1}$); área sombreada em cinza escuro: CINE ($= -56 \text{ J kg}^{-1}$). Para o perfil vertical do vento: 1/2 barbela: $2,5 \text{ m s}^{-1}$; barbela inteira: $5,0 \text{ m s}^{-1}$; bandeirola: $25,0 \text{ m s}^{-1}$. Ponto preto: altura da base de nuvem.

Tabela 1: Resultados para os eventos do Aeródromo de Campo de Marte.

Evento	Horário	Tipo de sistema	CAPE	CINE	Lifted Index	Altura do NCL	Jato de altos níveis
19/03/2003	18	CI - 1	1085	-15	-5	890	Não
10/01/2006	18 e 19	CI - 1	2120	-1	-5	820	Não
02/09/2007	22 e 23	CI - 1	747	-46	-5	820	Sim
16/12/2009	18	?	1932	-27	-5	880	Sim
25/11/2010	19 e 20	?	1286	-13	-5	880	Sim
25/01/2011	17 e 18	CI - 1	2066	-1	-5	870	Sim
10/02/2012	18 e 19	CI - 1	2377	0	-7	870	Não
05/12/2013	20 e 21	SF	1227	-56	-4	790	Sim
09/01/2014	19, 20 e 21	CI - 1	1099	-19	-5	810	Não
06/03/2014	19	?	1411	-4	-5	890	Sim
13/01/2015	22 e 23	CI - 1	302	-144	-2	800	Sim
29/03/2016	18 e 19	?	1378	-38	-3	830	Sim
12/03/2018	20	CI - 1	945	-11	-3	810	Sim

Símbolos: NICS = Nível do início da camada seca; CI-1 = Convecção Isolada; CI-2 = Convecção Isolada Cisalhada; SF = Sistema Frontal; ? = sistema indefinido.

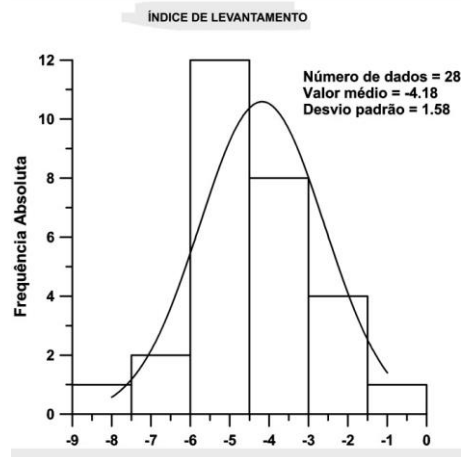
Da mesma forma, para os registros de granizo na Estação Climatológica do IAG/USP, localizada no Parque CIENTEC em São Paulo, a maioria dos eventos é de convecção isolada, somando 12 casos do tipo CI num total de 15. Nove destes casos correspondem a CI com topos circulares (tipo CI-1). Três deles referem-se a convecção isolada do tipo 2 (CI-2), também definida como célula cumulonimbos isolada, mas com topo oblongo (e não circular), em razão de ventos mais intensos na alta troposfera. A CAPE apresenta-se acima de 1000 J kg^{-1} em 8 dos 15 casos. A inibição de convecção de baixos níveis, CINE também está presente, com valores abaixo de -70 J kg^{-1} em 8 dos 15 casos. A Tabela 2 condensa os resultados para o Parque CIENTEC. Nela, vê-se que, em 11 dos 15 casos, o Índice de Levantamento é $-3,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Além disso, vê-se que, em 5 dos 15 casos, a altura da base das nuvens convectivas se dá abaixo de 870 hPa.

O histograma de frequências absolutas dos valores do Índice de Levantamento calculados para todos os 28 casos observados da Figura 3 mostra que há tendência à uma distribuição do tipo gaussiana (a curva do ajuste gaussiano foi acrescentada apenas como referência). Verificou-se que, quanto maior o número de casos do evento em análise, maior é a aderência dos dados à uma distribuição gaussiana. Para esta distribuição de valores, pode-se assumir que 67,8% dos casos analisados apresentam valores de IL entre -6.0 e -2.0, com média em torno de -4.0. Dessa forma, uma conclusão deste trabalho é que as condições de instabilidade atmosférica na camada entre 850 e 500 hPa (entre baixos e médios níveis), onde se concentra o vapor d'água atmosférico em mesoescala e escala sinótica, tende a ser de moderada a forte na maior parte dos casos observados de granizo à superfície. Com o desenvolvimento deste trabalho, outros índices de instabilidade atmosférica e severidade de tempestades serão estatisticamente avaliados, pois cada índice indica a instabilidade de diferentes camadas atmosféricas ou, ainda, diferentes situações físicas.

Tabela 2: Resultados para os eventos da Estação Climatológica do IAG/USP (Parque CIENTEC).

Evento	Horário	Tipo de sistema	CAPE	CINE	Lifted Index	Altura do NCL	Jatos de altos níveis
16/01/2003	19	LC	1279	-5	-5	880	Sim
10/11/2004	20 e 21	ACPF	527	-94	-3	840	Sim
18/02/2007	19 e 20	CI - 1	1437	-7	-2	820	Não
31/10/2007	21	CI - 1	758	-99	-5	820	Não
31/01/2010	16 e 17	CI - 2	1546	-79	-6	880	Não
04/02/2010	19	CI - 1	527	-38	-2	810	Sim
15/02/2010	22	CI - 2	1155	-29	-4	820	Não
22/02/2010	20 e 21	CI - 2	204	-99	-1	810	Sim
11/02/2011	22	SF	142	-76	-2	800	Não
18/02/2011	18 e 19	CI - 1	1057	-70	-3	870	Não
22/01/2012	18	CI - 1	792	-61	-3	870	Não
02/01/2015	22	CI - 1	549	-72	-4	800	Não
14/01/2015	21	CI - 1	1702	-77	-8	880	Não
24/02/2015	19 e 20	CI - 1	1344	-9	-5	820	Não
05/02/2016	18 e 19	CI - 1	1140	-19	-5	820	Não

Símbolos: conforme Tabela 1.

**Figura 3:** Histograma de frequências absolutas do Índice de Levantamento para o conjunto de 28 casos.

Conclusões

De um total de 28 casos de observação de granizo à superfície na RMSP, a partir das análises das imagens de satélite, sondagens e índices calculados, alguns padrões de recorrência podem ser destacados e enumerados a seguir:

1. presença de altos valores de CAPE ($> 1000 \text{ J kg}^{-1}$) na maioria dos casos, apesar do horário matutino de lançamento das sondagens, associado com valores significativos de CINE ($< -70 \text{ J kg}^{-1}$), os quais, quando concomitantes, indicam um maior potencial para a formação de tempestades;
2. a maioria dos casos está associada à convecção úmida profunda atuando de maneira isolada (referida com o acrônimo CI neste trabalho) sobre as duas localidades analisadas (Aeródromo de Campo de Marte e Parque CIENTEC);
3. 67% dos casos observados assumem valores de Índice de Levantamento entre $-6,0$ e $-2,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ o que mostra que a atmosfera local de baixos níveis é de moderada a fortemente instável para convecção intensa nos dias de ocorrência de granizo à superfície na RMSP;
4. há indicações, ainda a serem corroboradas, de que a base das nuvens em dias de ocorrência de granizo é mais baixa do que o valor normal de base de nuvens sob o aspecto climatológico.

Referências bibliográficas

- Cintineo, J. L., Smith, T. M., Lakshmanan, V., Brooks, H. E., Ortega, K. L., **2002**: An objective high-resolution hail climatology of the contiguous United States. *Weather Forecast.*, 27, 1235-1248. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-11-00151.1>
- Doswell, C. A., III, Schultz, D. M., **2006**: On the use of indices and parameters in forecasting severe storms. *Electronic J. Severe Storms Meteor.*, v. 1(3), p. 1-22.
- Martins, J. A., Brand, V. S., Capucim M. N, Felix, R. R., Martins, L. D., Freitas, E. D., Gonçalves, F. L. T., Hallak, R., Silva Dias, M. A. F., Cecil, D. J., **2017**: Climatology of destructive hailstorms in Brazil. *Atmospheric Research.*, 184, 126-138, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.10.012>.
- Punge, H. J., Kunz, M., **2016**: Hail observations and hailstorm characteristics in Europe: a review. *Atmos. Res.*, 176, 159-184. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.02.012>.
- Weisman, M. L., KLEMP, J. B., **1986**: Characteristics of Convective Storms. In: *Mesoscale Meteorology and Forecasting*. Peter S. Ray Ed., Amer. Meteor. Soc., p. 331-358.