



**Análise de Eventos de Tempo Significativo Atuantes  
Durante os Experimentos CHUVA-GOAmazon2014/15**  
Analysis of Significant Weather Events During CHUVA-GOAmazon2014/15 Experiments

Aline Luara dos Santos<sup>1</sup>; Cristiano Wickboldt Eichholz<sup>2</sup>;  
Enrique Vieira Mattos<sup>1</sup> & Dirceu Luis Herdies<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Recursos Naturais, Avenida BPS 1303, Pinheirinho, 37500-903, Itajubá, MG, Brasil

<sup>2</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos,

Rodovia Presidente Dutra km 40, 12630-000, Cachoeira Paulista, SP, Brasil

E-mails: [linesants@live.com](mailto:linesants@live.com); [cristiano.eichholz@gmail.com](mailto:cristiano.eichholz@gmail.com);

[enrique.vmattos@gmail.com](mailto:enrique.vmattos@gmail.com); [dirceu.herdies@inpe.br](mailto:dirceu.herdies@inpe.br)

Recebido em: 20/09/2019    Aprovado em: 03/02/2020

DOI: [http://doi.org/10.11137/2020\\_2\\_33\\_43](http://doi.org/10.11137/2020_2_33_43)

## Resumo

Este trabalho avaliou as diferenças físicas e termodinâmicas entre os sistemas precipitantes das estações seca, chuvosa e de transição que atuaram na região de Manaus/AM durante os experimentos CHUVA-GOAmazon2014/15. Foram empregados dados de refletividade do radar Banda-S de Manaus e índices meteorológicos calculados a partir de radiossondagens. Ao todo 4961 sistemas precipitantes foram identificados e rastreados através do algoritmo *Forecasting and Tracking the Evolution of Cloud Clusters* (ForTraCC), para os quais foram calculados a taxa de precipitação, tamanho e tempo de vida. Através da metodologia baseada em percentis foram definidos os Eventos de Tempo Significativo (ETS). Esses eventos são aqueles que apresentaram, estatisticamente os maiores valores (> percentil de 90 %) de taxa de precipitação, tamanho e tempo de vida dos sistemas precipitantes. Os resultados mostraram que, embora a estação chuvosa apresente maior conteúdo de água precipitável e acumulados de chuva, os sistemas precipitantes da estação seca foram os que apresentaram maiores taxas de precipitação e, por isso, maior potencial para o desenvolvimento de eventos severos. De forma geral, uma maior quantidade de ETS ocorreram durante as estações de transição e seca, período com menor umidade atmosférica, mas grandes valores de energia potencial disponível para convecção, energia de inibição convectiva e cisalhamento vertical do vento, o que contribuiu para processos convectivos mais intensos e duradouros.

**Palavras-chave:** Convecção; Precipitação; Eventos Extremos

## Abstract

This work evaluated the physical and thermodynamic differences between the precipitating systems of the dry, rainy and transition seasons in the Manaus/AM region during the CHUVA-GOAmazon2014/15 experiments. Reflectivity data from Manaus Banda-S radar and meteorological indexes calculated from the radiosonde were used. Approximately 4961 precipitating systems were identified and tracked using the Forecasting and Tracking the Evolution of Cloud Clusters (ForTraCC) algorithm and the precipitation rate, size and life span were calculated. Through the percentile methodology (> 90 %), Significant Weather Events (SWE) were defined. These events are those that presented, statistically, the highest values of precipitation rate, size and lifetime of the precipitating systems. The results showed that, although the rainy season has a higher content of precipitable water and accumulated rain, the dry season precipitating systems were the ones with the highest precipitation rates and, therefore, the greatest potential for the development of severe events. In general, a greater number of cases of SWE occurred during the transition and dry seasons, a period with less atmospheric humidity, but high values of potential energy available for convection, convective inhibition energy and vertical wind shear, which contributed to more intense and lasting convective processes.

**Keywords:** Convection; Precipitation; Extreme Events

## 1 Introdução

Eventos associados à ocorrência de precipitação intensa, granizo, ventos fortes e relâmpagos, possuem grande potencial para impactar negativamente vários setores da sociedade, causando desde prejuízos à agricultura e pecuária como também perda de vidas humanas (Teixeira & Satyamurty, 2007; Coumou & Rahmstorf, 2012). Desta forma, tais impactos justificam a importância de estudos sobre a organização e intensidade dos sistemas meteorológicos associados à esses eventos. Além disso, em um futuro cenário de aquecimento global é esperado um aumento no número de casos de precipitação extrema, uma vez que, o aumento na temperatura do ar favorece a evaporação e a capacidade do ar em reter umidade, o que contribui para a ocorrência de eventos extremos (Coumou & Rahmstorf, 2012; Golroudbary *et al.* 2019). Nas últimas décadas, um aumento no número de ocorrências de eventos extremos de precipitação ( $\geq 60 \text{ mm dia}^{-1}$ ) foi registrado na região metropolitana de São Paulo, e os principais índices climáticos (*El Niño-Southern Oscillation* (ENSO), *Pacific Decadal Oscillation* (PDO), *North Atlantic Oscillation* (NAO), *Atlantic Meridional Circulation* (AMC), *Large-scale Index for South America Monsoon* (LISAM)) explicaram fracamente a ocorrência desses eventos, indicando que outros fatores, como crescimento de ilhas de calor urbanas e a influência da poluição do ar na microfísica de nuvens devem ser considerados para explicar o aumento na ocorrência desses eventos (Coumou & Rahmstorf, 2012; Silva Dias *et al.*, 2013; Eichholz, 2017).

Este estudo objetiva analisar características básicas associadas à ocorrência de sistemas precipitantes (tamanho, duração, taxa de precipitação) na região de Manaus/AM, bem como avaliar a sensibilidade dessas características a diferentes condições ambientais. A região de Manaus/AM foi escolhida por apresentar regime de precipitação bem definido, bem como marcante variabilidade sazonal em diferentes características ambientais (Energia Potencial disponível para Convecção - CAPE, Energia de Inibição Convectiva - CINE, Água Precipitável - IWP e Cisalhamento Vertical do Vento - Shear) (Oliveira *et al.*, 2006; Machado *et al.*, 2018). Eventos de precipitação extrema, aqui mencionados como Eventos

de Tempo Significativo (ETS), também serão selecionados e avaliados para determinar quais condições ambientais tendem a favorecer sua ocorrência. Neste estudo serão utilizados dados de radar meteorológico, que tem como função principal estimar a precipitação em três dimensões com alta resolução espacial e temporal (Sun *et al.*, 2014). Os dados de radar serão a base de informações para o rastreamento das características das células de chuva, através da extrapolação do movimento e das características das células, no tempo e espaço (Otsuka *et al.*, 2016). Além disso, dados de radiossondas permitirão determinar a evolução de diferentes variáveis ambientais durante a atuação de sistemas precipitantes na região de estudo.

Este trabalho está dividido da seguinte forma: Na Seção 2 são apresentados os materiais e métodos utilizados, seguidos da apresentação da área e do período de estudo. A Seção 3 apresenta os resultados e discussão, onde detalha como diferentes características ambientais variaram ao longo do ano e como essas características influenciam o desenvolvimento da precipitação na região de estudo. Por fim, na Seção 4, são apresentadas as conclusões deste estudo, com uma compilação dos principais resultados encontrados.

## 2 Materiais e Métodos

### 2.1 Dados Obtidos Durante os Projetos CHUVA/GOAmazon

Os dados utilizados neste trabalho foram coletados durante os experimentos dos projetos CHUVA-GOAmazon2014/15 e focam apenas nos sistemas precipitantes que atuaram no ano de 2014. Os Projetos CHUVA (acrônimo para *Cloud Processes of the Main Precipitation Systems in Brazil: A Contribution to Cloud-Resolving Modeling and to the Global Precipitation Measurement*) e GOAmazon2014/15 (acrônimo para *Green Ocean Amazon*), coletaram dados da região de Manaus/AM, registrando com detalhes a evolução do regime de chuvas da região, assim como o contexto ambiental associado aos eventos ao longo do ano de 2014. Mais informações sobre os Projetos CHUVA e GOAmazon2014/15 podem ser encontradas em Machado *et al.* (2014), Martin *et al.* (2016) e Machado *et al.* (2018).

Durante os experimentos dos projetos CHUVA-GOAmazon2014/15 foram realizadas radiossondagens nos horários sinóticos padrões, i.e., 00, 06, 12 e 18 UTC e algumas sondagens adicionais durante a ocorrência de eventos de interesse dos projetos. Além disso, também foi utilizado o radar Banda-S, com raio de cobertura de 180 km, resolução espacial de 2 km e temporal de 12 minutos. O radar Banda-S estava localizado na cidade de Manaus/AM (Figura 1) e os dados de refletividade do produto *Constant Altitude Plan Position Indicator* (CAPPI) em 3 km de altura foram disponibilizados pelo Sistema de Proteção da Amazônia (SIPAM) e pelo quarto Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo (CINDACTA IV). No total, este estudo utilizou 1549 radiossondagens e 38250 imagens de CAPPI de radar Banda-S, cobrindo assim todo o ano de 2014. Os dados dos projetos CHUVA/GOAmazon2014/15 podem ser obtidos no seguinte endereço <<http://chuvaproject.cptec.inpe.br>>.

## 2.2 Rastreamento dos Sistemas Precipitantes

As características das células de chuva, associadas aos sistemas precipitantes foram obtidas por meio do algoritmo *Forecasting and Tracking the Evolution of Cloud Clusters* (ForTraCC), desenvolvido por Vila *et al.* (2008). Queiroz (2008) adaptou o algoritmo do ForTraCC para o uso de dados de radar meteorológico, o qual permitiu caracterizar sistemas

precipitantes com base em limiares de refletividade e tamanho. Neste trabalho foram utilizados os limiares de refletividade e tamanho de 30 dBZ e 10 pixels, respectivamente. A principal fonte de dados para esta etapa foram as imagens do produto CAPPI, no nível de 3 km de altura, provenientes do radar Banda-S de Manaus/AM, coletadas durante os experimentos dos Projetos CHUVA-GOAmazon2014/15. Este estudo considera o bimestre fevereiro e março (agosto e setembro) como a estação úmida (seca), os demais meses são considerados períodos de transição ao todo foram identificados e rastreados 4961 sistemas precipitantes, sendo 989 pertencentes a estação chuvosa, 3170 pertencentes a estação de transição e 802 pertencentes a estação seca. O resultado do processamento feito pelo ForTraCC permitiu avaliar as características dos sistemas precipitantes, como data e hora da iniciação assim como a evolução temporal do tamanho, da duração e refletividade máxima e média. No Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) o algoritmo ForTraCC é executado de forma operacional para o acompanhamento da evolução dos Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM) que atuam na América do Sul e maiores detalhes sobre o algoritmo encontram-se em Vila *et al.* (2008). O tamanho do sistema está associado ao raio efetivo, que equivale ao raio de um círculo com a mesma área da célula, obtido conforme a Equação 1:

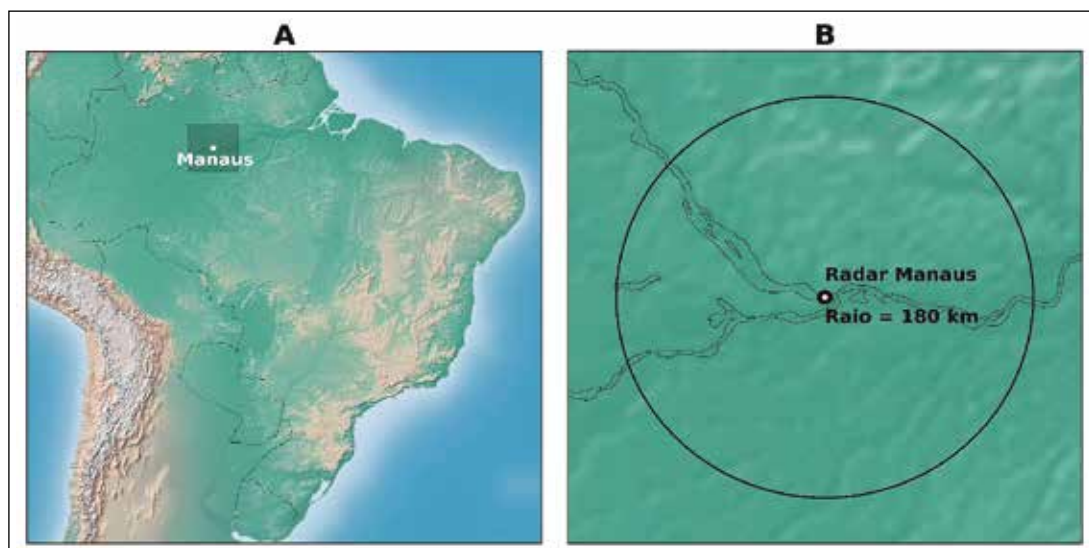


Figura 1 Região de estudo indicando: A. Cidade de Manaus/AM; B. Área de cobertura do radar Banda-S em Manaus/AM.

$$RE = (\sqrt{A_S / \pi}) P_X \quad (1)$$

Onde  $A_S$  representa o tamanho do sistema (em pixels),  $P_X$  o tamanho de um pixel do radar banda S de Manaus (em km), i.e., 2 km.

A estimativa da taxa de precipitação foi obtida utilizando a relação ZR de Marshall & Palmer (1948) e dados de refletividade do radar, aplicando-se a Equação 2.

$$Z = 200.R^{1,6} \quad (2)$$

Em que Z é o fator de refletividade em  $\text{mm}^6.\text{m}^{-3}$ , 200 e 1,6 são constantes obtidas empiricamente e R é a taxa de precipitação em  $\text{mm}.\text{h}^{-1}$ .

### 2.3 Sistemas Precipitantes e Características Ambientais

As radiossondagens forneceram as informações necessárias para a obtenção das variáveis ambientais utilizadas neste estudo. Os campos de CAPE e CINE foram definidos de acordo com Nascimento (2005). O campo de CAPE foi obtido seguindo a Equação 3.

$$CAPE = g \int_{NCE}^{NE} \frac{\theta_v(z) - \overline{\theta_v(z)}}{\theta_v(z)} dz \quad (3)$$

Onde NCE corresponde ao nível de convecção espontânea, NE se refere ao nível de equilíbrio,  $\theta_v$  a temperatura potencial virtual da parcela, e  $\overline{\theta_v}$  a temperatura virtual do ambiente e  $g$  a aceleração da gravidade.

O campo de CINE foi obtido seguindo a Equação 4,:

$$CINE = g \int_{SUP}^{NCE} \frac{\theta_v(z) - \overline{\theta_v(z)}}{\theta_v(z)} dz \quad (4)$$

Onde SUP refere-se ao nível da superfície, As unidades da CAPE e da CINE são representadas por  $\text{m}^2.\text{s}^{-2}$  ou  $\text{J}.\text{kg}^{-1}$ , respectivamente

Neste trabalho, o cisalhamento vertical do vento (Shear) foi definido conforme Johnson e Mapes (2001) e Markowski e Richardson (2010), e representa o módulo do vetor diferença entre a velocidade do vento médio dos primeiros 6 km da atmosfera e a velocidade do vento da superfície aos primeiros 500 m da atmosfera. A variável Shear foi obtida através da Equação 5.

$$Shear = |\overline{v_{6000}} - \overline{v_{500}}| \quad (5)$$

Onde  $|\overline{v_{6000}}|$  representa o vetor vento médio da camada entre a superfície e 6000 metros e  $\overline{v_{500}}$  representa o vetor vento médio entre a superfície e 500 metros. A unidade de Shear é  $\text{m}.\text{s}^{-1}$ .

O IWP foi obtido segundo metodologia proposta por Solot (1939) e posteriormente adaptada por Brown & Zang (1997), conforme Equação 6:

$$IWP = \int_{P_I}^{P_F} \frac{q dp}{g} \quad (6)$$

Onde  $q$  representa a umidade específica,  $dp$  o diferencial da pressão,  $P_I$  e  $P_F$  as pressões na superfície e no topo da camada.

O impacto das variáveis ambientais (CAPE, CINE, Shear e IWP) sobre as características dos sistemas precipitantes (taxa de precipitação, tamanho e duração) foi avaliado por meio do agrupamento das características ambientais em três categorias. Cada categoria foi definida através de percentis, de modo que a classe fraca foi composta pelos valores que abrangem os percentis de 0 a 33 %, a classe mediana do percentil 33 a 66 % e a classe intensa com valores acima do percentil 66 % (Tabela 1). Foram considerados ETS os sistemas em que os valores de taxa de precipitação média ( $\text{mm}.\text{h}^{-1}$ ), raio efetivo (km) e duração (horas) se encontravam iguais ou acima do percentil 90 %. Essa metodologia é similar a empregada por outros trabalhos da literatura, como Vicente (2005) e Pendergrass et al. (2018).

Variáveis Ambientais	Categoria		
	Fraco (0 – 33%)	Mediano (33 – 66%)	Intensa (> 66%)
CAPE (J.kg <sup>-1</sup> )	0 – 1003	1004 – 1683	1684 – 4140
CINE (J.kg <sup>-1</sup> )	0 – 3	4 – 11	12 – 372
Shear (m.s <sup>-1</sup> )	0 – 3,33	3,34 – 5,71	5,72 – 13,80
IWP (mm)	0 – 50,96	50,97 – 54,74	54,75 – 163,31

Tabela 1 Intervalo de valores obtidos para cada categoria das variáveis ambientais.

As relações entre as características dos sistemas precipitantes (taxa de precipitação, tamanho e duração) e as características ambientais (CAPE, CINE, IWP e Shear), foram avaliadas considerando os sistemas precipitantes que atuaram uma hora antes e uma hora após o lançamento das radiossondas, nos horários sinóticos das 06 UTC (02:00 horário local), 12 UTC (08:00 horário local), 18 UTC (14:00 horário local) e 00 UTC (20:00 horário local).

### 3 Resultados e Discussão

#### 3.1 Regimes de Precipitação em Manaus/AM

Marcante variação no regime de chuvas e na umidade atmosférica foi verificada na região de Manaus/AM, quando se analisou a taxa de precipita-

ção das células de chuva e o campo de IWP (Figura 2). Durante os meses de agosto e setembro foram registradas as maiores taxas de precipitação na região de estudo, no entanto, observou-se no mesmo período os menores valores de IWP (aproximadamente 45 mm), contrastando com os demais meses, onde o campo de IWP atingiu valores superiores a 55 mm. Esses resultados estão de acordo com Oliveira *et al.* (2006), demonstrando que a região de Manaus/AM apresenta um regime de precipitação bem definido, com período chuvoso atuando entre os meses de dezembro e maio, e período seco durante os meses de julho a novembro. Dessa forma, se obtém melhor distinção das características dos sistemas precipitantes e das variáveis ambientais, durante as diferentes estações.

A seguir será realizada a caracterização do ambiente considerando as variáveis ambientais CAPE, CINE, IWP e Shear. Posteriormente, será avaliada a influência das variáveis ambientais sobre as características apresentadas pelos sistemas precipitantes.

#### 3.2 Caracterização do Ambiente

##### 3.2.1 Energia Potencial

##### Disponível para Convecção (CAPE)

O índice CAPE está associado a energia potencial disponível para convecção e, portanto, tem

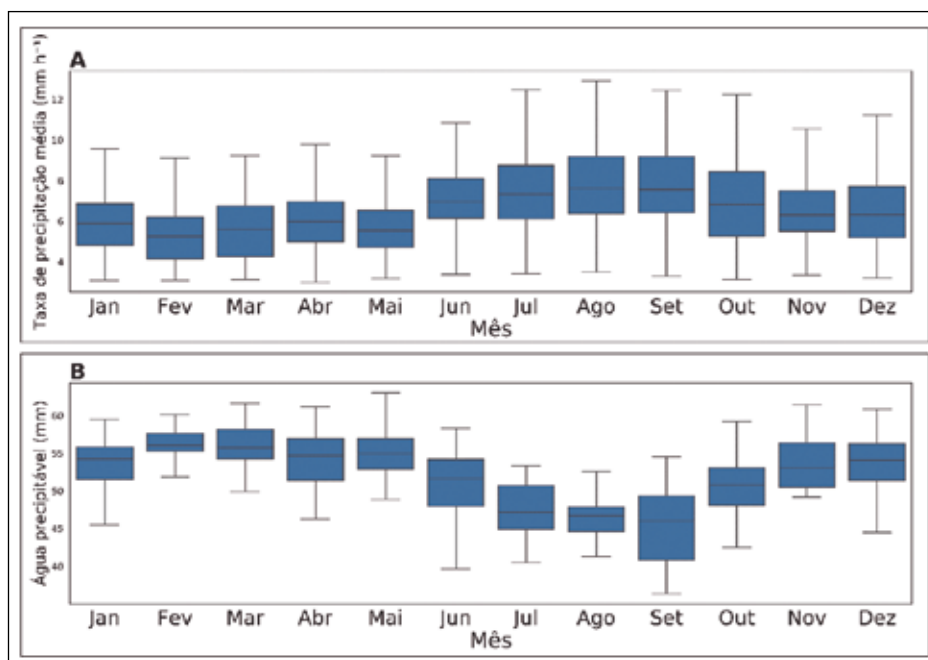


Figura 2 Evolução mensal da: A. Taxa de precipitação (mm.h<sup>-1</sup>); B. Água precipitável (IWP, mm).

uma forte correlação com a estabilidade atmosférica. Segundo Kirkpatrick *et al.* (2011), quanto maior seu valor, maior a chance de formação de tempestades severas, devido ao aumento da intensidade das correntes ascendentes, do fluxo de vapor d'água e da condensação, e assim da taxa de precipitação na superfície. Na Figura 3A nota-se que os maiores valores de CAPE foram observados na estação seca, período em que ocorreram as maiores taxas de precipitação (Figura 2A). Maiores valores de CAPE podem estar associados ao menor conteúdo de umidade na atmosfera (Figura 2B), que contribui para a menor nebulosidade e, conseqüentemente, maior aquecimento da superfície. Diferentemente do observado na estação chuvosa, onde um maior conteúdo de umidade na atmosfera facilita o desenvolvimento de processos convectivos, contribuindo para maior nebulosidade e precipitação na região, o que impede

o acúmulo de elevados valores de CAPE e, conseqüentemente, contribui para o desenvolvimento de uma atmosfera mais estável (Eichholz, 2017).

Machado *et al.* (2018) também encontraram resultados similares, no qual a estação seca apresentou valores de CAPE superiores aos observados na estação chuvosa. Além disso, a frequência com que a CAPE excede  $2000 \text{ J.kg}^{-1}$  é maior durante a estação seca. Em síntese, a estação chuvosa apresentou chuvas típicas de monções, com chuva moderada, contrastando com os eventos de chuva mais isolados e intensos durante a estação seca.

### 3.2.2 Energia de Inibição Convectiva (CINE)

O CINE está associado a energia de inibição convectiva, parâmetro que indica um obstáculo ao

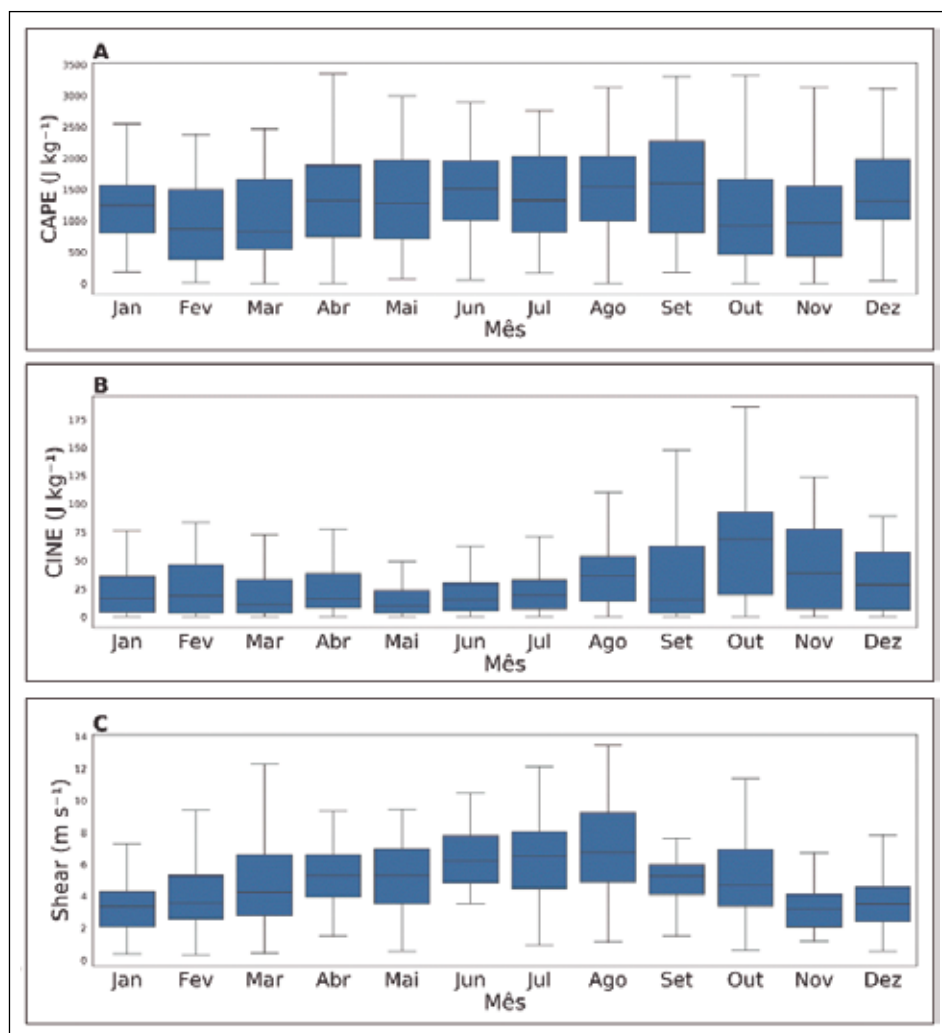


Figura 3 Evolução mensal das variáveis ambientais: A. CAPE ( $\text{J.kg}^{-1}$ ); B. CINE ( $\text{J.kg}^{-1}$ ); C. Shear ( $\text{m.s}^{-1}$ ).

desenvolvimento convectivo devido à falta de flutuabilidade próximo à superfície. Quando este obstáculo é nulo as tempestades se formam espontaneamente e não costumam ser severas (Nascimento, 2005). No entanto, quando os valores de CINE ultrapassam valores de  $20 \text{ J.kg}^{-1}$ , em geral, existe alguma inibição que pode ser vencida por um levantamento forçado, nessas situações a presença de elevados valores de CAPE e IWP podem causar tempestades severas.

A CINE na estação chuvosa, apresentou valores medianos entre  $10$  e  $20 \text{ J.kg}^{-1}$ , com máximos não ultrapassando  $90 \text{ J.kg}^{-1}$ , demonstrando pouca inibição para processos convectivos e o favorecimento a formação de sistemas com precipitação mais estratiforme (Figura 3B). Durante a estação seca, os valores medianos de CINE estiveram entre  $40$  e  $60 \text{ J.kg}^{-1}$ , com máximos próximos a  $200 \text{ J.kg}^{-1}$ , demonstrando maior inibição de processos convectivos. Segundo Machado *et al.* (2018), os valores de CINE mais altos e a menor quantidade de vapor de água reduz a ocorrência de convecção, mas quando a convecção é capaz de se desenvolver, ela tem todos os ingredientes para ser mais profunda, o que parece explicar as observações das Figuras 2B e 3B, que mostram menores valores de IWP na estação seca e maiores valores de CINE, respectivamente. Além disso, a Figura 2A mostra que a taxa de precipitação na estação seca foi superior a observada na estação chuvosa, o que evidencia a presença de convecção mais profunda.

### 3.2.3 Cisalhamento Vertical do Vento (Shear)

O Shear geralmente está associado a duração das tempestades, uma vez que maiores valores de cisalhamento vertical do vento propiciam maiores distâncias entre as correntes ascendentes e descendentes, separando áreas com maior potencial de precipitação de regiões associadas a correntes ascendentes, evitando que ambas se anulem, permitindo assim que os sistemas precipitantes perdurem por mais tempo (Weisman & Klemp, 1982).

Durante a estação chuvosa, a região de Manaus/AM esteve sob influência de Shear com valores médios variando entre  $2$  e  $4 \text{ m.s}^{-1}$ . Na estação seca esses valores variaram entre  $3$  e  $9 \text{ m.s}^{-1}$  (Figura 3C). Embora o Shear contribua para maior longevidade

dos sistemas, não foi possível observar essa influência. Tanto a duração quanto o tamanho dos sistemas precipitantes não apresentaram grande variabilidade ao longo do ano (Figura não mostrada).

### 3.3 Sistemas Precipitantes e Características Ambientais

As características dos sistemas precipitantes foram avaliadas dividindo-os em: i) sistemas regulares e ii) ETS. Os sistemas regulares (ETS) são aqueles em que suas propriedades como taxa de precipitação, tamanho e duração estiveram menores (maiores) que o percentil de 90 % (Tabela 1).

As Figuras 4, 5 e 6 e a Tabela 2 evidenciam as diferenças dos ETS quando comparados com eventos regulares, para diferentes classes de valores das variáveis ambientais. De forma geral, os ETS ocorreram preferencialmente durante as estações de transição e seca, período com menor conteúdo de IWP (Figura 4). Observou-se, também que a taxa de precipitação média apresentou sutil diferença entre os eventos regulares ( $5\text{-}10 \text{ mm.h}^{-1}$ ) e ETS ( $> 10 \text{ mm.h}^{-1}$ ) (Figura 4). No entanto, no que se refere ao raio efetivo (tamanho) e a duração, sistemas precipitantes regulares e ETS apresentaram diferenças marcantes. Para eventos regulares, tamanho e duração ficaram em torno de  $5 \text{ km}$  e  $1 \text{ hora}$ , respectivamente, nos ETS esses valores ultrapassaram  $10 \text{ km}$  e  $2 \text{ horas}$ , respectivamente (Figuras 5 e 6).

Tipo de Evento	Estação Chuvosa	Estação de Transição	Estação Seca	Anual
Regular	988	3139	783	4910
Significativo	1	31	19	51
Total	989	3170	802	4961

Tabela 2 Número de eventos precipitantes que ocorreram em 2014 em Manaus/AM.

Durante as estações chuvosa e de transição a taxa de precipitação de sistemas regulares diminuiu em ambientes com maiores valores de IWP, diferentemente do observado na estação seca, onde os sistemas com maiores taxas de precipitação ocorreram em ambientes com maiores valores de IWP (Figura 4E). Observou-se também, embora de forma sutil,

que todas as estações apresentaram sistemas regulares com taxas de precipitação maiores em ambientes com CAPE mais intensa (Figura 4A). Sistemas com menor taxa de precipitação, durante a estação chuvosa, foram observados com maior frequência em ambientes com valores de CINE mais intensas (Figura 4C). No entanto, durante as estações de transição e seca, as diferentes magnitudes de CINE não demonstraram o desenvolvimento de um padrão na taxa de precipitação apresentada pelos sistemas regulares (Figura 4C). De forma semelhante, nas diferentes estações, não se observou um padrão na taxa de precipitação de sistemas regulares associado a ambientes com diferentes magnitudes de Shear (Figura 4G). Por outro lado, ETS com maiores taxas de precipitação foram registrados em ambientes com Shear mais intenso e fraca IWP (Figuras 4H e 4F). Em contrapartida, Silva Dias (1987) documentou uma diminuição na eficiência de precipitação em função do aumento do cisalhamento vertical do vento, o que provavelmente deva-se ao método empregado no estudo. Por exemplo, os autores utilizaram a eficiência da precipitação (razão entre a precipitação observada e o fluxo de vapor de água que adentra a base da nuvem), enquanto o presente estudo emprega a estimativa da taxa de precipitação através da refletividade em 3 km de altura. Outras características, como a escala de tamanho das tempestades, mecanismos forçantes e efeitos locais, podem ser responsáveis pelas diferenças observadas. No entanto, tradicionalmente, forte cisalhamento vertical do vento e elevados valores de CAPE são ingredientes dinâmicos e termodinâmicos associados a tempestades intensas, que tipicamente podem produzir alta taxa de precipitação (Joe *et al.* 2012).

Ambientes com diferentes magnitudes de CAPE não registraram ETS com marcante distinção em suas taxas de precipitação. Por outro lado, ambientes com CINE mais intensa registraram ETS com taxas de precipitação levemente maiores que os observados em ambientes de fraca CINE, resultado sutil e mais evidente nas estações de transição e seca (Figuras 4B e 4D).

Ambientes com diferentes intensidades de CAPE não registraram um padrão evidente relacionado a diferentes tamanhos dos sistemas regulares

(Figuras 5A). No entanto, ambientes com CINE e Shear mais intenso e fraco IWP registraram sistemas regulares maiores, com raio efetivo variando entre 4 e 12 km (Figuras 5C, 5E e 5G). Ambientes com fraco IWP e intenso Shear registraram ETS maiores, com raio efetivo variando entre 10 e 24 km (Figuras 5F e 5H).

Ambientes com diferentes intensidades de CAPE, CINE, IWP e Shear, não registraram padrão na duração dos sistemas regulares (Figuras 6A, 6C, 6E e 6G). No entanto, ambientes com fraco CAPE e IWP e intenso Shear e CINE registraram ETS mais duradouros, superando 2 horas de longevidade (Figuras 6B, 6D, 6F e 6H).

A IWP apresenta uma relação positiva com a precipitação, uma vez que representa a massa do vapor de água de uma coluna integrada verticalmente (Marques *et al.*, 1979). A maior quantidade de IWP nos primeiros meses do ano (Figura 2B), indica grande quantidade de umidade disponível para condensar e precipitar (Myoung & Nielsen-Gammon, 2010). No entanto, as maiores taxas de precipitação ocorreram nos meses de agosto e setembro, período com menor IWP. Uma explicação para esse comportamento é que a menor disponibilidade de umidade na atmosfera dificulta o desenvolvimento de processos convectivos e, conseqüentemente, a formação de nuvens. No entanto, nessa condição, o aquecimento diurno é favorecido, aumentando a instabilidade atmosférica. Quando a inibição convectiva é superada, produz sistemas isolados e mais intensos.

#### 4 Conclusões

Este estudo avaliou a influência de diferentes variáveis ambientais sobre as características dos sistemas precipitantes, na região de Manaus/AM durante o ano de 2014. Os resultados evidenciaram que ETS ocorreram predominantemente durante as estações de transição e seca. O ambiente comum para o desenvolvimento dos ETS foi caracterizado por valores elevados de CAPE, CINE e Shear, juntamente a baixos valores IWP, configurando assim um ambiente mais restrito ao desenvolvimento convectivo. Sistemas precipitantes regulares se mostraram sutilmente afetados pelas variáveis ambientais, quando



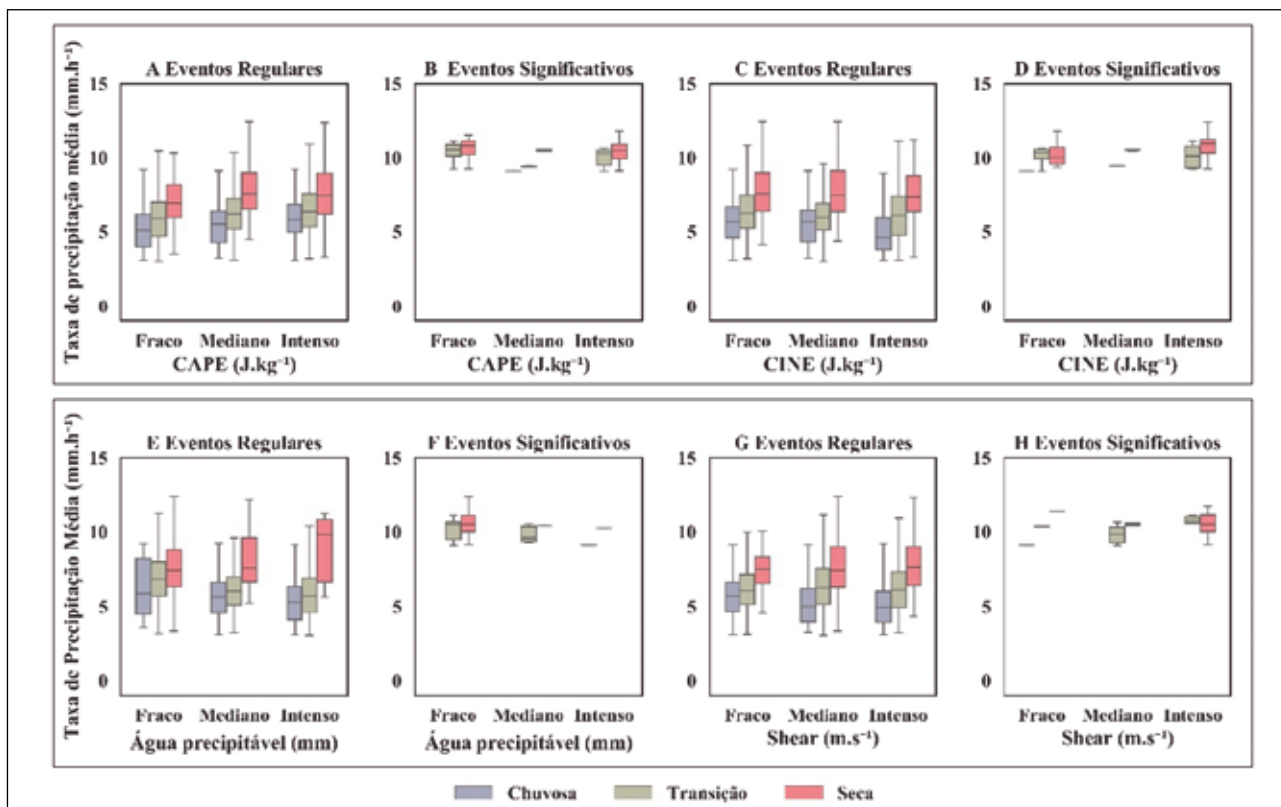


Figura 4 Evolução da taxa de precipitação (mm.h<sup>-1</sup>) para os eventos regulares e significativos em função das classes de: A.B. CAPE (J.kg<sup>-1</sup>); C.D. CINE (J.kg<sup>-1</sup>); E.F. Água precipitável (IWP, mm); G.H. Shear (m.s<sup>-1</sup>) para a estação chuvosa (azul), transição (verde) e seca (vermelha).

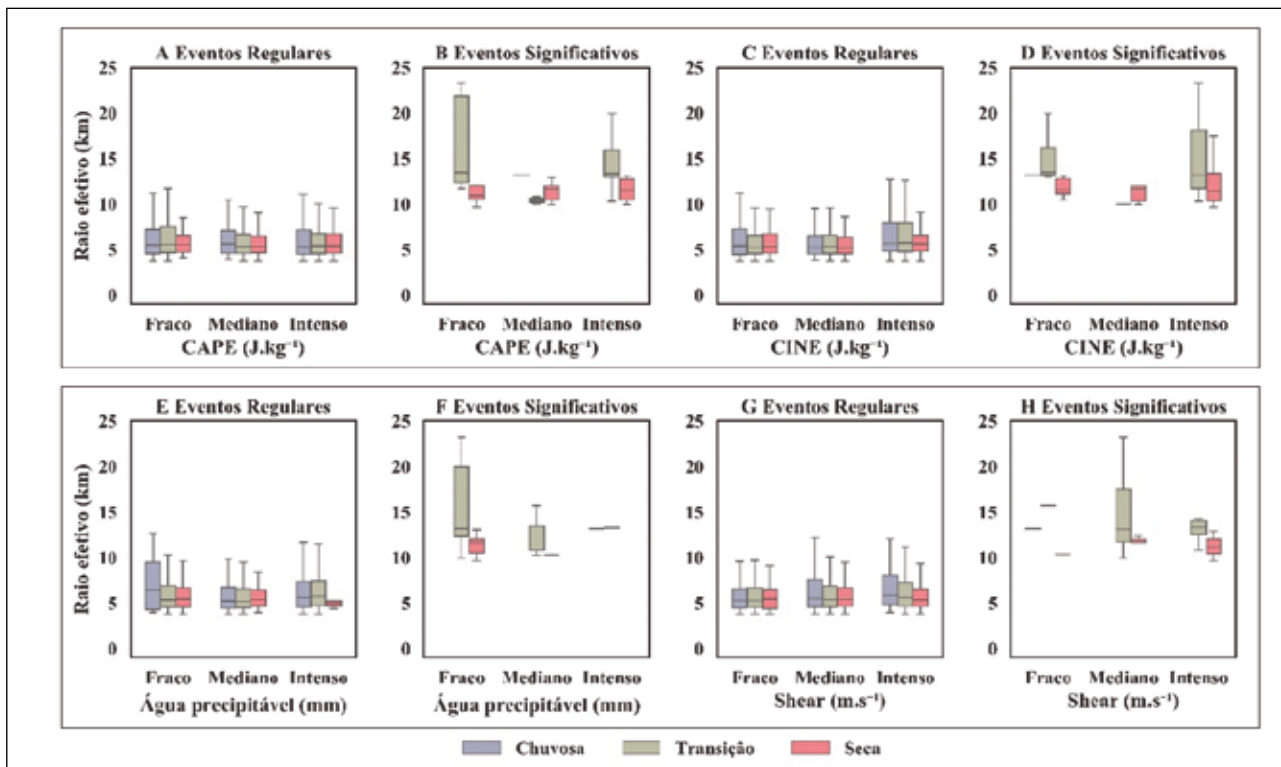


Figura 5 Evolução do raio efetivo (km) para os eventos regulares e significativos em função das classes de: A.B. CAPE (J.kg<sup>-1</sup>); C.D. CINE (J.kg<sup>-1</sup>); E.F. Água precipitável (IWP, mm); G.H. Shear (m.s<sup>-1</sup>) para a estação chuvosa (azul), transição (verde) e seca (vermelha).

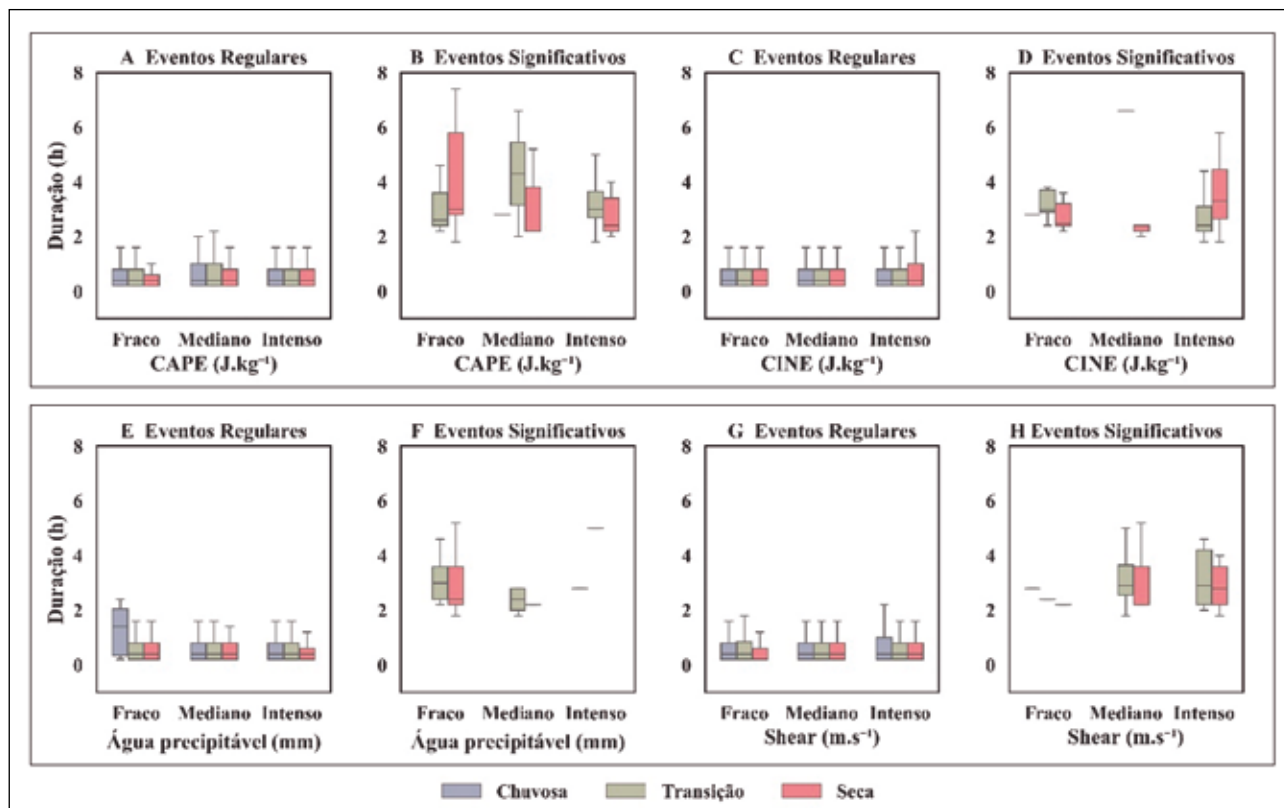


Figura 6 Evolução da duração (horas) para os eventos regulares e significativos em função das classes de: A.B. CAPE ( $J.kg^{-1}$ ); C.D. CINE ( $J.kg^{-1}$ ); E.F. Água precipitável (IWP, mm); G.H. Shear ( $m.s^{-1}$ ) para a estação chuvosa (azul), transição (verde) e seca (vermelha).

comparados com ETS. Essa característica pode estar associada ao menor tamanho e duração dos sistemas regulares, que limita a influência das características ambientais sobre os sistemas precipitantes. Uma vez que, a menor duração e área dos sistemas precipitantes reduz a interação entre os sistemas precipitantes e o contexto ambiental ao qual estão imersos.

A taxa de precipitação de sistemas regulares e ETS foram registrados em ambientes com características similares. Embora a estação chuvosa tenha apresentado os maiores acumulados de chuva, os sistemas precipitantes da estação seca foram os que apresentaram maiores taxas de precipitação e, por isso, maior potencial para eventos severos. Isso indica que, de forma geral, ambientes mais restritos ao desenvolvimento convectivo tendem a diminuir o número de eventos, no entanto, quando a inibição convectiva é superada, os sistemas tendem a apresentar altas taxas de precipitação. Uma continuação deste trabalho está em andamento e busca entender os processos microfísicos e elétricos associados à ocorrência dos ETS.

## 5 Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro e ao Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pela infraestrutura para o processamento dos dados.

## 6 Referências

- Brown, R.G. & Zhang, C. 1997. Variability of midtropospheric moisture and its effect on cloud-top height distribution during TOGA COARE. *Journal of the Atmospheric Science*, 54: 2760 - 2774.
- Coumou, D. & Rahmstorf, S. 2012. A Decade of Weather Extremes. *Nature Climate Change*, 2(7): 491-496.
- Eichholz, C.W. 2017. Análise Cinemática e Dinâmica da Propagação de Células de Chuva e Aglomerados de Nuvens. Programa de Pós-graduação em Meteorologia,

- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Tese de Doutorado, 159p.
- Golroudbary, V. R.; Zeng, Y.; Mannaerts, C. M. & Su, Z. 2019. Response of extreme precipitation to urbanization over the Netherlands. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 58(4): 645-661.
- Joe, P.; Dance, S.; Lakshmanan, V.; Heizenreder, D.; James, P.; Lang, P.; Hengstebeck, T.; Feng, Y.; Li, P.W.; Yeung, H.Y.; Suzuki, O.; Doi, K. & Dai, J. 2012. Automated Processing of Doppler Radar Data for Severe Weather Warnings. In: BECH, J. (ed.). *Doppler Radar Observations - Weather Radar, Wind Profiler, Ionospheric Radar and Other Advanced Applications*. Editora In-Tech, p. 33-74.
- Johnson, R.H. & Mapes, B.E. 2001. Mesoscale Processes and Severe Convective Weather. In: DOSWELL, C.A. (ed.). *Severe Convective Storms*. American Meteorological Society, p. 71-122.
- Kirkpatrick, C.; McCaul Jr., E.W. & Cohen, C. 2011. Sensitivities of Simulated Convective Storms to Environmental CAPE. *Monthly Weather Review*, 139(11): 3514-3532.
- Machado, L.A.T.; Dias, M.A.F.S.; Morales, C.; Fisch, G.; Vila, D.; Albrecht, R.; Goodman, S.J.; Calheiros, A.J.P.; Biscaro, T.; Kummerow, C.; Cohen, J.; Fitzjarrald, D.; Nascimento, E.L.; Sakamoto, M.S.; Cunningham, C.; Chaboureau, J.P.; Petersen, W.A.; Adams, D.K.; Baldini, L.; Angelis, C.F.; Sapucci, L.F.; Salio, P.; Barbosa, H.M. J.; Landulfo, E.; Souza, R.A.F.; Blakeslee, R.J.; Bailey, J.; Freitas, S.; Lima, W.F.A. & Tokay, A. 2014. The CHUVA Project: How Does Convection Vary Across Brazil?. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(9): 1365-1380.
- Machado, L.A.T.; Calheiros, A.J.P.; Biscaro, T.; Giangrande, S.; Dias, M.A.F.S.; Cecchini, M.A.; Albrecht, R.; Andreae, M.O.; Lima, W.F.A.; Artaxo, P.; Borrmann, S.; Braga, R.; Burleyson, C.; Eichholz, C.W.; Fan, J.; Feng, Z.; Fisch, G.; Jensen, M.P.; Martin, S.T.; Pösch, U.; Pöhlker, C.; Pöhlker, M.L.; Ribaud, J.F.; Rosenfeld, D.; Saraiva, J.M.B.; Schumacher, C.; Thalman, R.; Walter, D. & Wendisch, M. 2018. Overview: Precipitation Characteristics and Sensitivities to Environmental Conditions During Goamazon2014/5 And ACRIDICON-CHUVA. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(9):6461-6482.
- Markowski, P. & Richardson, Y. 2010. *Mesoscale meteorology in midlatitudes*. Chichester, Wiley-Blackwell, 430p.
- Marques, J.; Santos, J.M.D. & Salati, E. 1979. O Armazenamento Atmosférico de Vapor D'água Sobre a Região Amazônica. *Acta Amazonica*, 9(4): 715-721.
- Marshall, J.S. & Palmer, W.M.K. 1948. The Distribution of Raindrops with Size. *Journal of Meteorology*, 5(4):165-166.
- Martin, S.T.; Artaxo, P.; Machado, L.A.T.; Manzi, A.O.; Souza, R.A.F.; Schumacher, C.; Wang, J.; Andreae, M.O.; Barbosa, H.M.J.; Fan, J.; Fisch, G.; Goldstein, A.H.; Guenther, A.; Jimenez, J.L.; Pöschl, U.; Dias, M.A.S.; Smith, J.N. & Wendisch, M. 2016. Introduction: Observations and Modeling of the Green Ocean Amazon (Goamazon2014/5). *Atmospheric Chemistry & Physics Discussions*, 16(8):4785-4797.
- Myoung, B. & Nielsen-Gammon, J.W. 2010. Sensitivity of Monthly Convective Precipitation to Environmental Conditions. *Journal of Climate*, 23(1):166-188.
- Nascimento, E.L. 2005. Previsão de tempestades severas utilizando-se parâmetros convectivos e modelos de mesoescala: Uma estratégia operacional adotável no Brasil? *Revista Brasileira de Meteorologia*, 20(1): 121-140.
- Oliveira, F.N.M.D.; Araújo, R.L.C.D.; Carvalho, J.D.S. & Silva, C.L.D. 2006. Inferência de Mudanças Climáticas na Região de Manaus (AM) Usando Dados Geotermiais e Meteorológicos. *Revista Brasileira de Geofísica*, 24(2): 169-187.
- Otsuka, S.; Tuerhong, G.; Kikuchi, R.; Kitano, Y.; Taniguchi, Y.; Ruiz, J.J.; Satoh, S.; Ushio, T. & Miyoshi, T. 2016. Precipitation Nowcasting with Three-Dimensional Space-Time Extrapolation of Dense and Frequent Phased-Array Weather Radar Observations. *Weather and Forecasting*, 31(1): 329-340.
- Pendergrass, A.G.; Conley, A. & Vitt, F.M. 2018. Surface and Top-of-Atmosphere Radiative Feedback Kernels for CESM-CAM5. *Earth System Science Data*, 10(1):317-324.
- Queiroz, A.P. 2008. Monitoramento e Previsão Imediata de Tempestades Severas Usando Dados de Radar. Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Dissertação de Mestrado, 131p.
- Silva Dias, M. A. F. 1987. Sistemas de mesoescala e previsão de tempo a curto prazo. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 2: 133-150.
- Silva Dias, M.A.F.; Dias, J.; Carvalho, L.M.; Freitas, E.D. & Dias, P.L.S. 2013. Changes in Extreme Daily Rainfall for São Paulo, Brazil. *Climatic Change*, 116(3-4): 705-722.
- Solot, S. B. 1939. Computation of depth of precipitable water in a column of air. *Mon. Wea. Rev.* 67(100): 58.
- Sun, J.; Xue, M.; Wilson, J.W.; Zawadzki, I.; Ballard, S.P.; Onville-Hoomeyer, J.; Joe, P.; Barker, D.M.; Li, P.W.W.; Golding, B.; Xu, M. & Pinto, J. 2014. Use of NWP for Nowcasting Convective Precipitation: Recent Progress and Challenges. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(3): 409-426.
- Teixeira, M.S. & Satyamurty, P. 2007. Dynamical and Synoptic Characteristics of Heavy Rainfall Episodes in Southern Brazil. *Monthly Weather Review*, 135(2): 598-617.
- Vicente, A.K. 2005. Eventos Extremos de Precipitação na Região Metropolitana de Campinas. Programa de Pós-graduação em Geografia, Universidade Estadual de Campinas, Dissertação de Mestrado, 160p.
- Vila, D.A.; Machado, L.A.T.; Laurent, H. & Velasco, I. 2008. Forecast and Tracking the Evolution of Cloud Clusters (Fortrace) Using Satellite Infrared Imagery: Methodology and Validation. *Weather and Forecasting*, 23(2): 233-245.
- Weisman, M.L. & Klemp, J.B. 1982. The Dependence of Numerically Simulated Convective Storms on Vertical Wind Shear and Buoyancy. *Monthly Weather Review*, 110(6): 504-520.