



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgf>



Variabilidade Espacial e Temporal de Descargas Atmosféricas na Região Norte

Arthur da Costa Almeida¹, José Ricardo Santos de Souza², Marcela Machado Pompeu³,
Wanda Maria do Nascimento Ribeiro⁴

¹UFPA - Universidade Federal do Pará, Campus de Castanhal, Doutor em Eng Elétrica, Professor, (arthur@ufpa.br)

²UFPA - Universidade Federal do Pará, Instituto de Geofísica, Doutor em Meteorologia, Professor, (jricardo@ufpa.br)

³UFPA - Universidade Federal do Pará, Mestra em Ciências Ambientais, (marcelapompeu5@hotmail.com)

⁴UFPA - Universidade Federal do Pará, Mestra em Ciências Ambientais, (wandaribeiro10@hotmail.com)

Artigo recebido em 17/03/2020 e aceito em 19/04/2020

RESUMO

A região norte do Brasil, que inclui uma parte da Amazônia, possui condições climáticas que favorecem a ocorrência de chuvas ao longo de todo o ano, muitas delas com grande quantidade de descargas atmosféricas. Um conhecimento detalhado da variabilidade espacial e temporal desses eventos pode ajudar tanto no planejamento de sistemas de proteção de linhas de transmissão de energia elétrica, sistemas de telecomunicações, como no apoio às populações que habitam nessa região. Neste trabalho foi feita uma análise estatística de dados da rede de detecção de raios Starnet, num total de mais de 220 milhões de eventos que ocorreram na área de estudo durante os anos de 2009 a 2015, extraindo-se deles informações relevantes quanto às ocorrências de descargas atmosféricas na região. Como resultado das análises estatísticas, foram produzidos mapas com a densidade de raios, mapa de dias de tempestade e gráficos mostrando a sua distribuição horária, mensal e por dia e hora ao longo do ano.

Palavras-chave: região norte, densidade de raios, mapa cerâmico

Spatial and Temporal Variability of Lightning in the Northern Region

ABSTRACT

The Northern region of Brazil, which includes part of the Amazon, has climatic conditions that favour the occurrence of rainfall throughout the year, many of them with a large number of lightning strikes. Detailed knowledge of the spatial and temporal variability of these events can help both in the planning of protection systems for electric power transmission lines, telecommunications systems as in supporting the populations that live in that region. In this research, a statistical analysis of the Starnet lightning location system data was produced, in a total of more than 220 million events that occurred in the study area during the years of 2009 to 2015, extracting from them relevant information regarding the occurrences of lightning strikes in the region. As a result of this statistical analysis, maps were produced with the lightning density and thunderstorm days over the region, with graphs showing their monthly, daily and hourly distribution throughout the year.

Keywords: northern region, lightning density, keraunic map

Introdução

A região norte do Brasil é formada pelos estados de Acre, Amapá, Amazonas, Pará, Rondônia, Roraima e Tocantins, com uma área estimada de 3.876.753 km², uma população de 18 milhões de habitantes e ocupa 45% do território nacional. Possui uma grande parte de sua área ocupada pela floresta amazônica e é cortada por grandes e caudalosos rios.

Também possui um grande potencial de geração de energia elétrica, potencial esse que vem sendo explorado pelo governo brasileiro, como por exemplo nas usinas de Tucuruí (8300 MW) e Belo

Monte (11200 MW). Como essas usinas ficam distantes dos centros consumidores, é necessária a construção de imensas linhas de transmissão, cobrindo milhares de quilômetros, tais como a que liga a UHE Tucuruí às cidades de Manaus, no Amazonas e Macapá, no Amapá.

Basicamente o clima da região é caracterizado por duas estações, a estação seca, que vai do final de maio a dezembro e a estação chuvosa que vai do final de dezembro ao início de maio. Na estação seca, a temperatura varia entre 24 a 35 graus e na chuvosa, varia entre 24 e 30 graus. Chove ao longo do ano, num total anual de 2400

mm com a máxima ocorrendo em março, com cerca de 400 mm e a mínima em outubro, com cerca de 40 mm.

Esse perfil climático da região contribui para a ocorrência de uma grande quantidade de descargas atmosféricas, com grande atividade cerâmica.

Souza e Rocha (1996, 1997, 1999) em pesquisas pioneiras realizadas na Amazônia na década de 90 já davam conta da grande quantidade de raios sobre a região e de seu potencial de causar efeitos prejudiciais em sistemas elétricos e de telecomunicações (Pinto Jr, 1997).

Descarga atmosférica, ou raio, é um fenômeno natural, caracterizado por uma transferência rápida de grande quantidade de carga elétrica entre duas regiões da atmosfera separadas por quilômetros de distância (Uman, 2001; Rakov e Uman, 2003). Ela pode ocorrer entre a nuvem e o solo, entre duas regiões de uma nuvem ou entre duas nuvens. Dessas, a mais importante, por conta dos efeitos que pode causar aos seres humanos, é a descarga nuvem-solo. Uma típica descarga nuvem-solo é composta por um ou vários pulsos individuais que transferem carga para o solo, com correntes cuja intensidade varia de alguns kiloamperes até cerca de 300 kA, com duração média de 20 a 50 microssegundos (Cooray, 2009). Em geral, os pulsos subsequentes de um mesmo raio viajam pelo mesmo canal e, assim, caem no mesmo lugar, embora também possam incidir em pontos do solo separados por vários metros e até quilômetros. Para efeitos práticos, considera-se uma descarga atmosférica o conjunto de pulsos que caem em uma área de 10 km de raio em um intervalo máximo de 1 segundo (Orville, 1994; Cummins et al. 1998).

A descarga atmosférica produz uma grande emissão de radiação eletromagnética em ampla faixa do espectro, indo desde radiações na faixa do visível até às frequências dos raios gama (Cooray, 2003)

No período de 2009 a 2015 foram registradas mais de 220 milhões de descargas atmosféricas na região amazônica, por conta de suas características geográficas e climáticas peculiares. Em todo o país, os prejuízos materiais e os danos provocados por falhas nos sistemas de energia elétrica e de telecomunicações devidas aos raios costumam ser contabilizados na casa dos milhões de reais, anualmente (CBPF, 2010; Santos et al. 2014; Pompeu et al, 2018; Silva et al, 2018).

Por outro lado, convive-se atualmente na Amazônia com a construção de grandes usinas hidrelétricas, caso de Belo Monte no Xingu e de linhas de transmissão de energia com milhares de quilômetros de extensão, atravessando grandes rios

e imensas florestas em torres com mais de 200 m de altura, como a linha que liga a UHE Tucuruí a Manaus e Macapá. Essas linhas estão sujeitas a incidência de raios durante todo o seu trajeto, o que pode implicar em falhas no fornecimento de energia, com todos os impactos negativos econômicos e sociais que decorrem desses eventos (Pereira et al. 2017).

Para a ocorrência de descargas atmosféricas contribuem as temperaturas, altas durante todo o ano e a grande quantidade de umidade existente na floresta amazônica. Esses fatores favorecem a convecção e a consequente formação de nuvens de tempestade com alto potencial de eletrificação.

Segundo Cooray (2009), os principais fatores que influenciam a ocorrência de nuvens de tempestades do tipo cumulonimbus são (a) disponibilidade de vapor de água na atmosfera, de onde se origina a energia gasta durante a tempestade; (b) a instabilidade atmosférica, causada pela diferença de temperatura entre vários níveis da atmosfera, sendo um de seus indicadores o valor da CAPE (Convective Available Potential Energy); (c) condição baroclínica da atmosfera, caracterizada por uma uniformidade horizontal de temperatura em algumas camadas (Rakov e Uman, 2003). Nessas condições atmosféricas, a tendência das tempestades é de se desenvolverem verticalmente, favorecendo o processo de eletrificação de nuvens, com a consequente transferência de cargas elétricas, na forma de raios.

Se, por um lado temos a grande quantidade de ocorrências de raios na região, por outro lado temos carência de estações meteorológicas e de redes de detecção desses eventos que possam fornecer a informação necessária às ações de proteção de sistemas elétricos e de vidas existentes nessa região. Embora atualmente já existam sistemas de detecção de raios embarcados em satélites, como a missão TRIMM e o mais recente deles o GOES-R 16 que fica em órbita equatorial estacionária sobre o continente americano (NASA, 2019), os dados de redes terrestres que discriminam as ocorrências de raios nuvem-solo são as mais importantes para esse tipo de estudo e planejamento. Desse tipo, são conhecidas apenas a Sarnet e a WWLLN, que fazem cobertura de toda a Amazonia.

Portanto, nesse contexto de grande quantidade de ocorrências de descargas atmosféricas na região norte e de carência de redes de detecção desses eventos, a proposta deste trabalho é fazer um estudo sistemático dessas ocorrências, levantando uma climatologia dos raios nessa região, usando dados disponíveis pela rede Sarnet, em um período que vai de 2009 a 2015,

com o objetivo de se obter como resultados, informações estatísticas relevantes sobre a distribuição espacial e temporal dessas ocorrências, reunindo em um só lugar essas informações, esperando-se que possam ser de utilidade para pesquisadores que se interessem pelo assunto ou que precisem dessas informações para objetivos de planejamento de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas.

Material e métodos

Dados da Starnet.

A Starnet (**S**ferics **T**racking and **R**anging **N**etwork) é uma rede de detecção de raios formada por antenas de rádio (sensores) que operam na faixa eletromagnética VLF (Very Low Frequency), com centro em 7-15 kHz, que é onde ocorre o pico das emissões eletromagnéticas, os sferics, emitidos pelas descargas atmosféricas, principalmente as do tipo nuvem-solo (CG) (Morales, 2011). Esses sferics sofrem pouca atenuação da atmosfera, por isso podem ser detectados a centenas de quilômetros de sua fonte de origem. Isso permite que a Starnet possa monitorar grandes áreas, como a Amazônia, com um número relativamente pequeno de sensores. A localização da ocorrência da descarga atmosférica é calculada pelo algoritmo de diferença do tempo de chegada (ATD), usando dados de pelo menos quatro sensores, onde cada par de sensor define uma hipérbole de possíveis localizações. No caso da Starnet, o erro na localização é da ordem de 6 a 12 km e a eficiência de detecção do sistema (DE) é estimada na faixa de 50 a 60% (Morales, 2001; Dentel et al. 2014). Para os objetivos deste trabalho e para a escala geográfica em que foi feito, esses números são perfeitamente aceitáveis.

Para este trabalho foram usados dados de descargas atmosféricas registradas pela Starnet no período de janeiro de 2009 a dezembro de 2015, num total de mais de 220 milhões de eventos (strikes).

A área de estudo é um retângulo delimitado pelos meridianos 45° W a 75° W e pelos paralelos 6° N e 15° S, cobrindo toda a região norte brasileira.

Processamento.

Para o processamento desses dados foram desenvolvidos três programas no ambiente computacional e estatístico R (R Core Team, 2018). Em particular, foram utilizadas as bibliotecas *rgdal* e *raster* para o processamento de dados espaciais em forma matricial (grids) e vetorial (shapefiles).

O programa 1 leu os dados originais da Starnet e selecionou os que pertenciam à área de

estudo, criando um arquivo que foi usado pelos demais programas.

O programa 2, dividiu a área de estudo em uma malha, onde cada célula possui dimensões de 0,1° x 0,1° graus geográficos, o que nas latitudes amazônicas, corresponde aproximadamente a uma área de 11km x 11km, ou 121 km², dando origem a duas matrizes com dimensões de 210 linhas (latitude) por 300 colunas (longitude), ou 63000 células. Na primeira delas foram armazenados os dados de densidade de raios, o total de raios que incidiu naquela célula no período observado. Na segunda delas, foi armazenado o total de dias de ocorrências de descargas atmosféricas naquela área, dando origem ao índice cerâmico. Além dessas duas matrizes, foi criada uma terceira matriz, para apurar a distribuição das ocorrências pelas horas dos dias ao longo do ano. Essa terceira matriz possui dimensões de 24 linhas (horas) por 365 colunas (dias do ano).

O programa 3 processou as matrizes obtidas no programa 2 e gerou os diversos gráficos, mapas e tabelas, mostrados como resultados da pesquisa.

Dados da rede do SIPAM (RDR-SIPAM)

Para a obtenção da distribuição da corrente nas descargas atmosféricas incidentes na região, foi necessário usar os dados da RDR-SIPAM, a Rede de Detecção de Raios do Censipam, o Centro Gestor do SIPAM, localizado em Belém, PA. Essa rede operou na parte oriental da Amazônia, na região norte, durante o período de 2004 a 2009. Ela era formada por 12 sensores do tipo LPATS-IV, fabricados pela empresa Vaisala. Eles estavam distribuídos pelos estados do Pará, Maranhão e Tocantins e Mato Grosso, com a maior parte deles localizada no Pará, indo de Breves e Belém, até Tucuruí, no sul do estado, o que lhe dava uma geometria aproximada de um retângulo estreito no sentido norte-sul. Esses sensores calculavam a localização das descargas usando o algoritmo de diferença de tempo de chegada (ATD, em inglês).

Para cada par de sensores era criada uma hipérbole de possíveis localizações. Fazendo a interseção dessas hipérbolas para 3 ou 4 pares de sensores, obtinha-se a localização aproximada, com erro estimado de até 50m, segundo especificação do fabricante. O alcance confiável de cada sensor, segundo a Vaisala, era de até 300 km. (Global Atmospheric, 1998). Além dos dados de tempo e da localização, essa rede também fornecia dados de tipo de descarga (intra-nuvem, ou nuvem solo) e uma estimativa da corrente de pico, que foi usada neste trabalho (Souza et al. 2008; Almeida et al. 2008; Pereira et al. 2008; Dentel et al. 2014).

Para este estudo foram usados os dados dos anos de 2006 a 2008, num total de pouco mais de 6 milhões de eventos detectados. Desses, foram excluídos os raios identificados como sendo do tipo intranuvem, restando somente os do tipo nuvem-solo, que foram processados pelo programa desenvolvido para esse fim. Também foram excluídos os raios cujo valor estimado de corrente de pico estava acima de 150 kA, seguindo recomendação do próprio fabricante e de outros pesquisadores (Cummins, 1998; Lyons, 1998; Kochtubajda, 2007).

Resultados e discussão

Mapa de densidade de raios

Os dados de descargas atmosféricas foram lidos pelo programa e, de acordo com a sua localização geográfica (longitude, latitude), foi relacionado a uma das células da grade e o contador dessa célula foi incrementado de 1. No final do processamento, os valores acumulados nas células foram divididos por 121 (área aproximada) e pelo número de anos, 7, obtendo-se assim um valor médio de descargas por km²/ano, a unidade usual para expressar a densidade de raios.

Um sumário estatístico dos valores médios de densidade encontrados é dado por valor mínimo

(0), primeiro quartil (3), mediana (5), média (5), terceiro quartil (8), valor máximo (20).

A Figura 1 mostra o mapa de densidade de raios por km² na região norte. As áreas com maior densidade, acima de 10 km² por ano, situam-se próximas a Manaus, no Amazonas, no sul do Pará e no estado do Tocantins. As áreas com menor densidade, estão distribuídas principalmente no Pará, Amapá e Roraima, com menos de 5 raios por km².

Herrera et al. (2018) processaram dados de 14 anos de ocorrências de descargas atmosféricas na Colômbia, na fronteira com o estado do Amazonas, na região norte. Eles encontraram valores de densidade muito acima dos mencionados neste trabalho, mas consideram que a Colômbia possui algumas regiões consideradas de alta incidência de raios. Por outro lado, em regiões do mundo localizadas em áreas de latitudes mais altas e climas mais suaves, por exemplo, no sul da China, valores bem mais baixos de densidade tem sido registrados (Zhang et al. 2018).

Soula et al. (2016) após fazerem a análise de dados de distribuição de raios na África Central, uma das áreas com maior atividade cerâmica do planeta, apresentaram valores da ordem de 60 a 80 raios por km²/ano, em uma região de latitude e clima semelhante aos da região norte do Brasil.

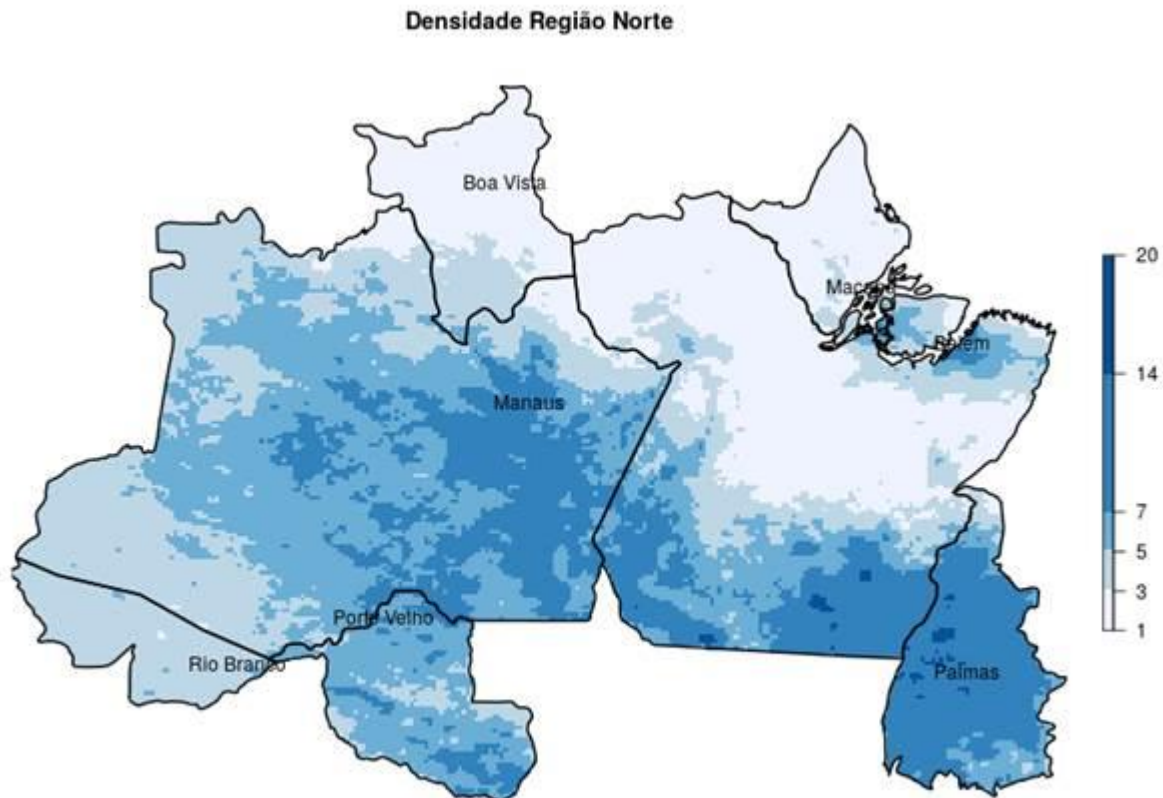


Figura 1. Mapa de densidade de raios na região norte, mostrando quantidade de raios por km²/ano.

Mapa de atividade cerâmica

Para o mapa cerâmico admitiu-se que pelo menos uma ocorrência de raio em um determinado dia na área da célula, contabilizava como um dia de tempestade naquela célula. Também mais de uma ocorrência contabilizava como um único dia de tempestade naquela célula. Ao final, os totais foram divididos pela quantidade de anos contidos nos dados, para se obter um valor médio por ano em cada célula. A partir dessa matriz foi gerado o mapa de contorno preenchido com cores.

Essa metodologia, usada neste trabalho para contabilizar um dia de tempestade difere da definição usual de dia de tempestade comumente usada na Meteorologia, pois esta se baseia na audição de pelo menos um trovão na área, independente de haver precipitação ou não. No caso deste trabalho, foram usados os dados do sistema de localização de raios, Starnet, para esse fim.

Um sumário estatístico dos valores médios de densidade encontrados é dado por valor mínimo (12), primeiro quartil (70), mediana (90), média (84), terceiro quartil (110), valor máximo (162).

Na Figura 2 é apresentado o mapa cerâmico mostrando a quantidade média de dias de tempestade observados durante o ano. Valores acima de 120 dias de tempestade por ano são observados em quase todo o estado do Amazonas, nas fronteiras com Venezuela e Bolívia e notadamente na região de Manaus. Também no sul

do Pará e na região de Belém e Marajó, no estado do Pará, na vizinhança de Belém e do Arquipélago do Marajó, além de em quase todo o estado de Rondônia e norte do Tocantins.

Este mapa cerâmico, que aponta o número médio de dias de tempestade na região, está coerente com as observações feitas por Fisch, Marengo, Nobre (2014), pois segundo eles, o nível de precipitação na região fronteira do Brasil com a Bolívia e Venezuela, assim como na região de Belém e Marajó, são observados altos níveis de precipitação durante todo o ano. Na primeira região, essa característica pode ser explicada pela proximidade da Cordilheira dos Andes e pela Zona de Convergência Inter-Tropical (ZCIT) enquanto que na região de Belém, explica-se pela presença de linhas de instabilidade que se formam pela parte da tarde. Também Cohen (1995) dá conta da existência dessas linhas de instabilidade nessa região, o que contribui de forma decisiva para a elevada quantidade de precipitação observada na área (Dentel, 2014). Destaque-se, além disso, que esses números registram apenas os dias de tempestade em que houve ocorrência de raios. Os dias em que houve apenas precipitação sem raios, não foram registrados pelo sistema da Starnet e, portanto, não foram contabilizados. Deduz-se daí, que o número efetivo de dias em que houve precipitação é maior do que o mostrado neste mapa.

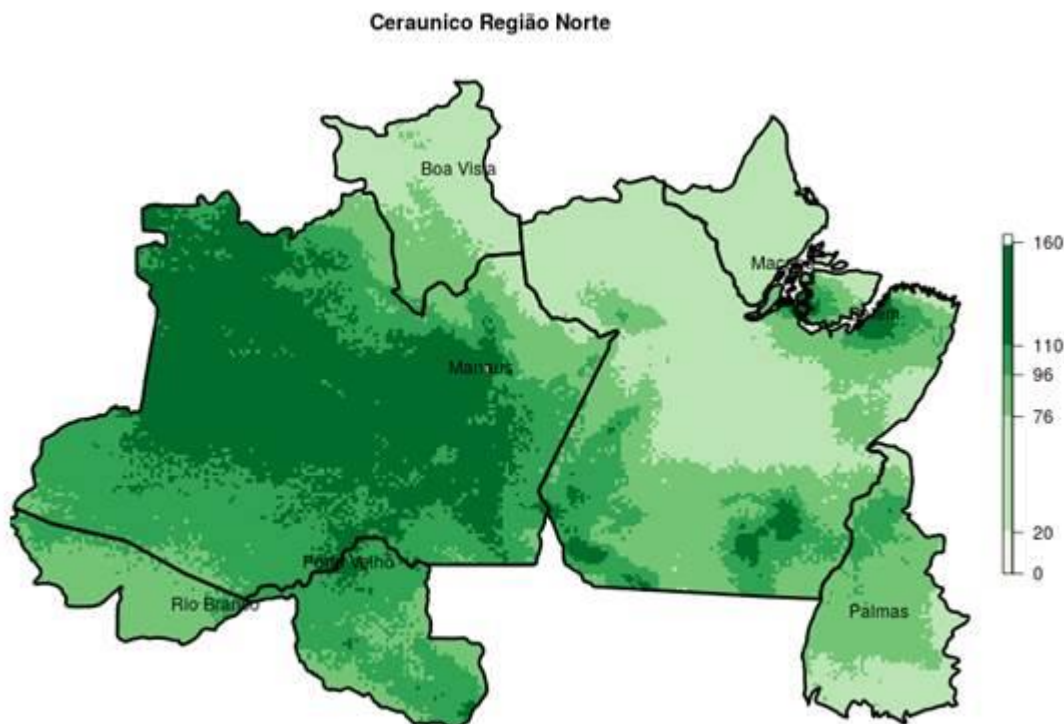


Figura 2. Mapa cerâmico da região norte, mostrando quantidade de dias de tempestade durante o ano.

Relação funcional entre índice ceráunico e densidade de raios

Alguns pesquisadores propõem a existência de uma relação funcional entre os dias (ou horas) de tempestade e a densidade de raios. Uma das mais conhecidas e usadas, que relaciona a densidade de raios com o número de dias de tempestade, é a de Anderson et al. (1984), dada pela equação $N_g = 0.04T_d^{1.25}$, onde N_g é a quantidade de raios por km²/ano e T_d é o número de dias de tempestade por ano.

Com os dados obtidos, diversas simulações foram feitas, obtendo-se resultados variados como se verá na discussão a seguir. Inicialmente, para se fazer as diversas modelagens, os dados de descargas e de dias de tempestade foram agrupados

na matriz original. Foi criada uma matriz agrupando os dados da matriz em blocos de 10 x 10 células da matriz original. Nessa matriz foi feito inicialmente o ajuste de Anderson. Depois, foram feitos mais dois ajustes com funções não-lineares, mantendo o mesmo formato funcional da equação de Anderson, obtendo-se para os parâmetros os valores de a=0.06 e b=0.92 e na segunda modelagem os valores de a=0.001 e b=1.90. Os resultados são exibidos na Figura 3. Desses, o modelo recomendado pela NBR-5419 (ABNT, 2018), a norma técnica brasileira para Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas, é o modelo de Anderson que, embora não se ajuste muito bem a esses dados da Amazônia, erra pelo excesso, o que neste caso, não é ruim.

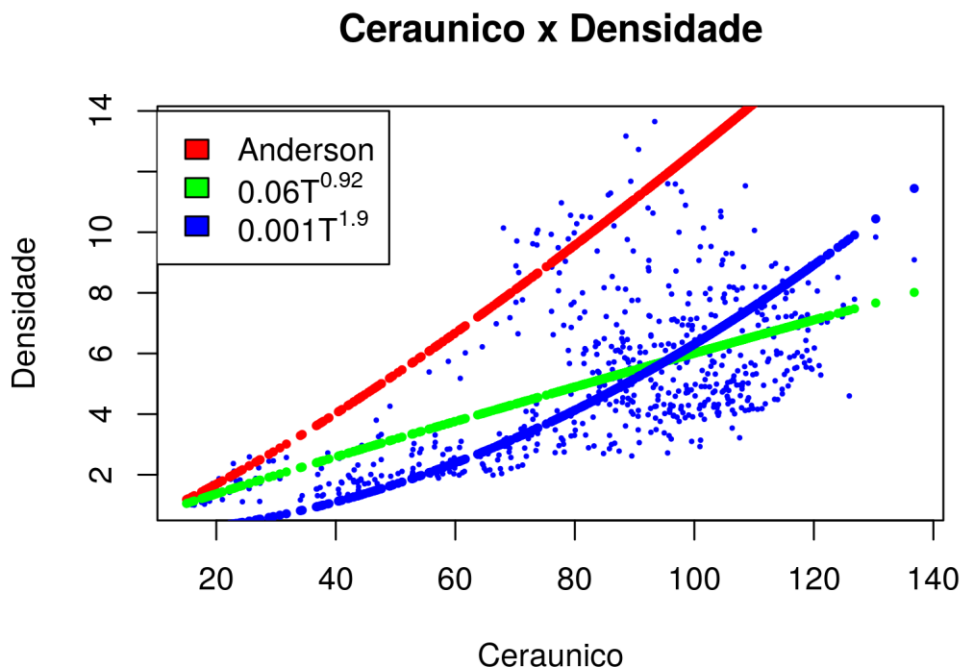


Figura 3. Relação funcional empírica entre dias de tempestade e densidade de raios.

Mapa de distribuição horária das descargas atmosféricas.

O total de eventos de descargas atmosféricas foi acumulado em 24 contadores, um para cada hora do dia. Em seguida, foi calculada a porcentagem de cada hora e representada no mapa por uma coluna.

Normalmente, esse tipo de gráfico mostra o eixo horizontal iniciando no 0 (zero) e indo até as 23 horas. Neste caso, considerou-se que poderia haver uma influencia da presença do sol acima do horizonte, aquecendo a atmosfera, principalmente nas latitudes amazonicas, onde essa presença é de

cerca de 12 horas, todos os dias do ano. Acredita-se que com o gráfico tendo início às 6 horas da manhã no eixo horizontal, a hora em que o sol começa o seu caminho acima do horizonte, tem-se uma representação mais apropriada do fenômeno.

Segundo Cooray (2003) e Rakov & Uman (2007), o mecanismo de eletrificação das nuvens, condição essencial para a ocorrência de raios, algumas condições precisam ser atendidas; a) a altura da nuvem precisa ser de 3 ou mais km, pois quanto maior verticalmente for a nuvem, maior a chance de armazenar cargas elétricas; b) a nuvem deve possuir uma boa parte dela acima do nível da

temperatura atmosférica de 0 graus, pois isso facilita a coexistência, na mesma nuvem, de regiões de gelo e de água supercongelada; c) grande atividade convectiva, o que permite o rápido crescimento vertical da nuvem.

E essas características são resultado da grande energia disponibilizada pelo aquecimento

fornecido pelo Sol acima do horizonte, bem como da grande quantidade de umidade disponível no solo da região.

A consideração desses fatos justifica, a nosso ver, o reposicionamento das horas no gráfico exibido.

RAIOS POR HORA

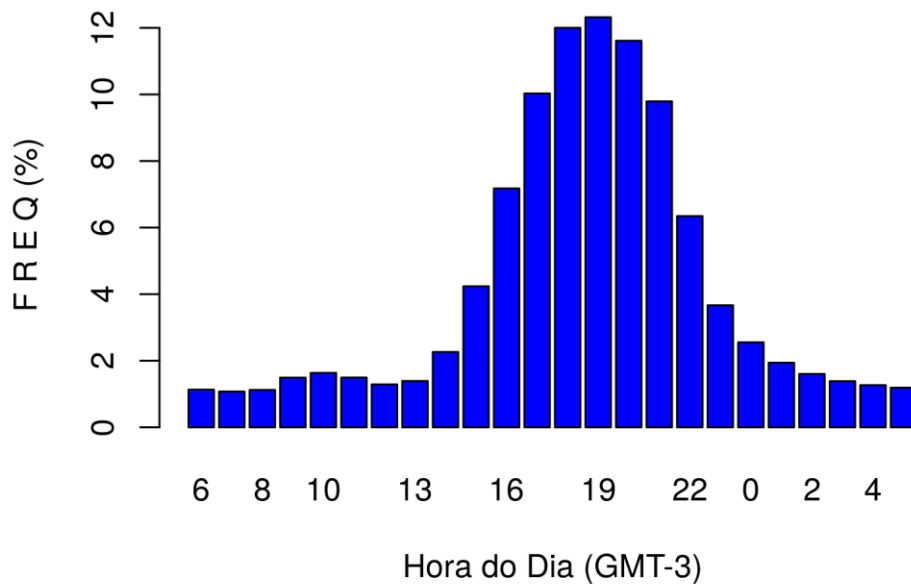


Figura 4. Distribuição horária de ocorrências de raios na região norte (Hora: GMT-3)

Distribuição dos raios pelos dias do ano

Foi gerada uma matriz de 24 linhas por 365 colunas, para acumular a quantidade de raios por dia e hora do ano. Somando-se as colunas dessa matriz, obtem-se o total de raios pelos dias do ano, mostrado em porcentagem na Figura 5.

Observa-se neste gráfico que a maioria dos eventos de descargas atmosféricas ocorre durante a estação seca, em meados do mês de outubro, embora a maior quantidade de chuvas ocorra na estação chuvosa que vai de dezembro a maio. O nível mais baixo ocorre durante os meses de junho e julho, na transição entre as duas estações mais marcadas na região.

Raios x Dias do ano

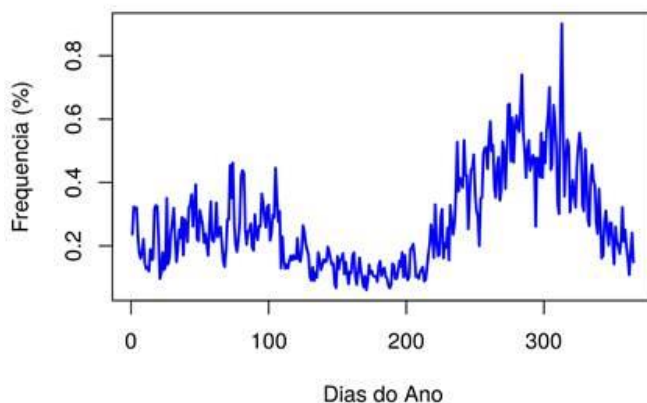


Figura 5. Mapa de distribuição de ocorrências de raios pelos dias do ano.

Distribuição mensal das descargas durante o ano

A distribuição das ocorrências de descargas atmosféricas mensal nos anos de estudo reitera fatos já mostrados em outros gráficos e

mapas. a distribuição é bimodal com máximos em março e outubro/novembro e ponto de mínimo em julho/agosto.

DESCARGAS POR MES: 2009-2015

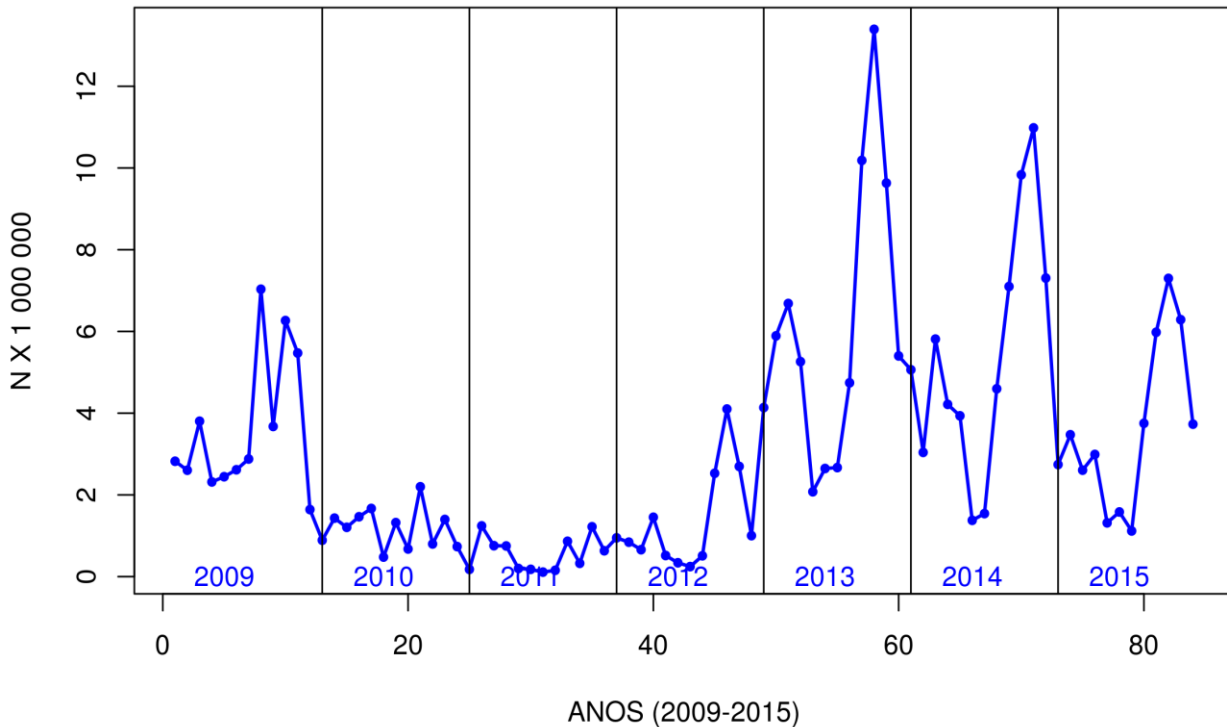


Figura 6. Distribuição de ocorrências de raios mês a mês durante os anos de estudo.

Distribuição Temporal de Descargas Atmosféricas pelas horas do dia e pelos dias do ano.

A Figura 7 mostra os valores horários em milhares de ocorrências por hora.

Observa-se na Figura 7 que quase a totalidade das ocorrências de descargas atmosféricas na região ocorre no final da tarde e, durante o ano, o pico maior se concentra na estação seca, que vai de julho a dezembro. O padrão é de uma distribuição bimodal durante o ano. Na transição entre as estações úmida e seca, nos meses de maio a julho, ocorre uma diminuição significativa da atividade cerâmica na região.

Herrera et al. (2018) encontrou horários bastante diferentes para os picos da distribuição horária de descargas atmosféricas na vizinha Colômbia. Para as latitudes colombianas os picos acontecem mais pela parte da noite no horário

local. Essas diferentes distribuições também podem ser afetadas por outras variáveis locais tais como relevo, uso e cobertura do solo.

Soula et al. (2016) apresentam resultados de um estudo feito na República Democrática do Congo, na África Central, considerada a área com maior atividade cerâmica do planeta, de acordo com registros de vários satélites meteorológicos. Os resultados apresentados para a variação diurna das ocorrências de descargas atmosféricas concordam com os resultados obtidos neste trabalho. A variação anual também apresenta um mínimo nos meses de junho a agosto. Observe-se que o Congo fica em uma área de latitude próxima do equador terrestre e também exposto a uma grande quantidade de radiação solar durante o ano inteiro.

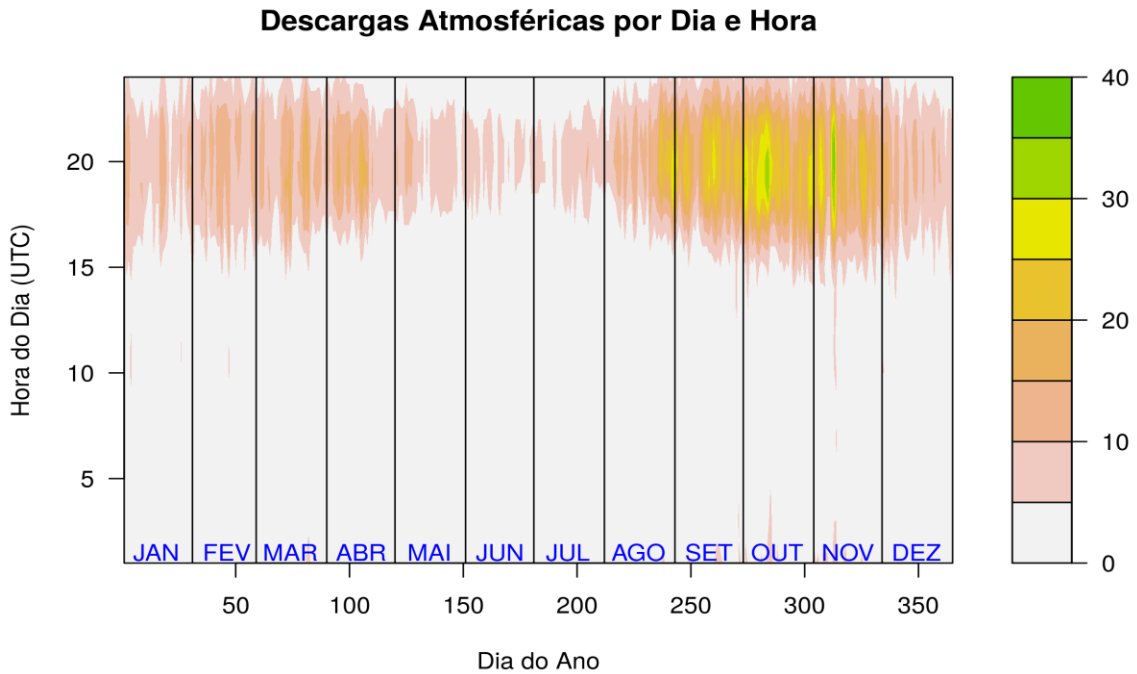


Figura 7. Distribuição anual de ocorrências de raios pelas horas do dia e pelos dias do ano (em milhares).

Distribuição da intensidade da corrente de pico

Essa distribuição foi obtida com os dados da Rede Sipam, uma vez que a Rede Starnet não fornece a informação de corrente estimada. Feita a exclusão dos dados mencionada anteriormente, os dados foram agrupados em blocos de 10 kA cada. Em seguida, foi calculada a porcentagem representativa de cada bloco de corrente de pico, o

que foi mostrado no gráfico.

A distribuição das intensidades da corrente de pico mostra um decréscimo constante a cada intervalo de 10 kA. A mediana situa-se em torno dos 35 kA, quase 20% acima dos 30 kA aceitos pela norma da ABNT NBR-5914.

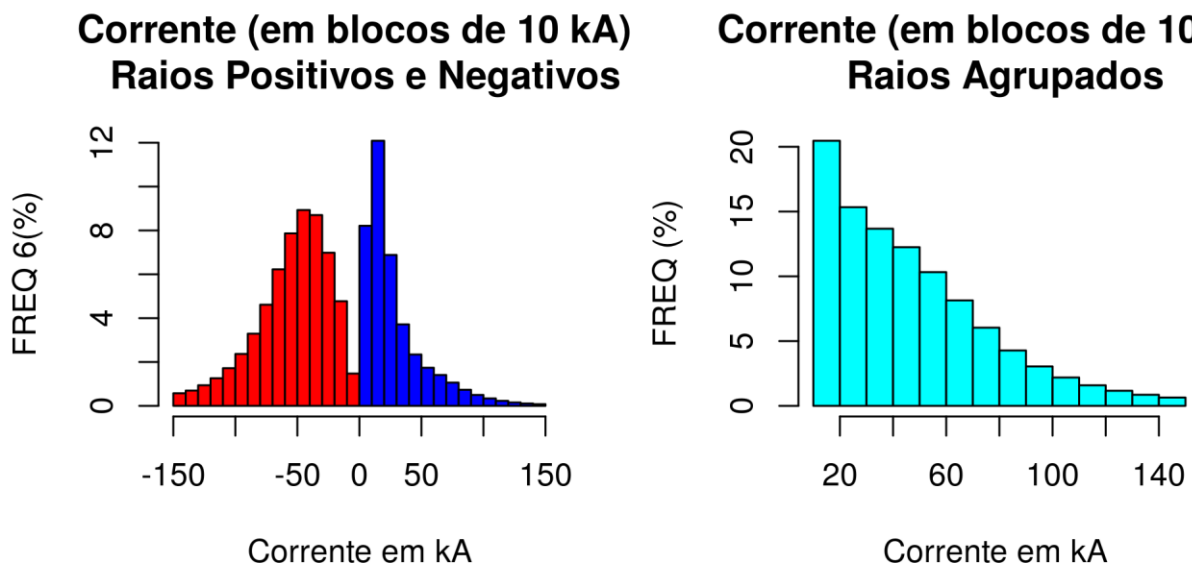


Figura 8. Distribuição da corrente de pico das dos raios, em blocos de 10 kA. Na figura (a) temos a distribuição dividida entre raios positivos (azul) e negativos (vermelho). Na figura (b) todos os dados de corrente foram agrupados com seus valores positivos.

Considerações Finais

Neste trabalho foi feito um estudo estatístico dos dados de ocorrências de raios disponibilizados pela rede Starnet, uma das poucas que operam nessa atividade nessa região brasileira. Ficou evidente a intensa atividade de ocorrência de descargas atmosféricas na região norte do Brasil. Esta região possui um clima marcado por muita umidade, altas temperaturas e forte atividade convectiva, principalmente na parte da tarde. E isso favorece em muito a ocorrência de tempestades com nuvens eletrificadas que produzem essas descargas.

Como resultados foram mostrados o mapa de densidade de ocorrência de raios na região, exibindo valores elevados, além das médias mundiais em países com climas mais amenos, mas semelhantes aos encontrados em países que se situam na faixa equatorial do planeta. Algumas partes da região alcançam a média de 20 raios por km² por ano, que é um valor elevado. Levando-se em conta que atualmente o Governo Federal está expandindo a oferta de usinas hidroelétricas na região, o que obriga à construção de grandes extensões de linhas de transmissão para que essa energia produzida em locais remotos possa chegar onde ela é necessária, verifica-se a importância desse tipo de informação para os responsáveis pelo planejamento, construção, operação e proteção dessas linhas.

Outro resultado foi o mapa cerâmico exibindo o número médio de dias de tempestade que ocorrem na região. Este resultado está diretamente relacionado com o do mapa anterior, pois enquanto o primeiro traz uma informação estática, estimando quantos raios caem por km² por ano, este novo mapa informa quantos dias de ocorrências, em média, devem ser esperados durante o período de um ano.

Uma relação empírica, estatística, permite relacionar de forma aproximada a quantidade de dias de tempestade com a quantidade de raios que podem ocorrer em uma dada região. Esse é o resultado mostrado na Figura 8, alertando também que o modelo recomendado não se adequa muito bem às peculiaridades da região.

Complementando e consolidando as duas informações anteriores, o mapa de ocorrência de raios pelos dias e horas do ano, traz de forma compacta uma visão do comportamento dessas ocorrências ao longo do ano, permitindo a programação de atividades de manutenção, por exemplo, em dias e horários com menos atividade cerâmica, tornando mais seguras essas atividades.

O mapa de distribuição da corrente de pico ajuda no sentido de melhor planejar

equipamentos e sistemas de proteção contra descargas atmosféricas na região. Como resultado também verifica-se que a mediana da corrente está cerca de 20% acima do valor recomendado pela norma da ABNT NBR-5914, para estas latitudes amazônicas.

Com esses resultados apresentados acreditamos estar preenchendo uma lacuna de informações sobre as ocorrências e características das descargas atmosféricas que incidem nesta parte do Brasil.

Agradecimentos.

Ao Prof Carlos Morales, da rede STARNET, pela disponibilidade dos dados de descarga atmosférica que tornaram possível esta pesquisa.

Ao Centro Gestor do SIPAM Belém, Censipam, pela disponibilidade dos dados de descargas atmosféricas da RDR-SIPAM dos anos em que ela esteve em funcionamento.

Referencias

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2018. NBR-5419 Proteção contra descargas atmosféricas.
- Almeida, A. C. Rocha, B. R. P. Souza, J. R. S. Monteiro, J. H. A. Souza, W. A.; 2008. Statistical Analysis of High Intensity Lightning Strokes Detected by SIPAM'S LDN over the Amazon Region. GROUND 2008 & 3d LPE. Florianopolis.
- Anderson, R. B, A. J. Eriksson, H. Kroninger, D. V. Meal, M. A. Smith. 1984. Lightning and thunderstorm parameters. IEEE International Conference Lightning and Power Systems, London.
- CBPF - Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas. <http://portal.cbpf.br/index.php?page=Noticias.VerNoticia&id=248>. Acesso em 12/01/2010.
- Cohen, J.C.P., Silva Dias, M.A.F., Nobre, C.A. 1995. Environmental conditions associated with Amazonian squall lines: a case study. Monthly Weather Review 11, 3163-3174.
- Cooray, V. 2003. The Lightning Flash. The Institution of Electrical Engineers. London.
- Cooray, V. 2009. On The Upper Limit Of Peak Current In Return Strokes Of Lightning Flashes. Proceedings of X SIPDA, pp 167-172, Curitiba.
- Cummins, K. L, Murphy, M. J, Bardo E. A, Hiscox, W. L, Pyle, R. B, Pifer, A. E. 1998. A combined TOA/MDF Technology Upgrade of the U.S. National Lightning Detection Network. Journal of Geophysical Research, Vol. 103, N° D8, pp. 9035-9044.

- Dentel, M; Souza, J. R. S; Rocha. B. R. P; 2014. Evaluation of STARNET lightning detection performance in the Amazon region. *International Journal of Remote Sensing*, v35, no 1, pp 115-126.
- <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2013.862604>
- Dentel, M; Souza, J. R. S; Rocha. B. R. P; Holle, R. L; Saraiva. J. M. B. 2014. Lightning activity associated with amazonian coastal squall lines: a case study. 23d Lightning Detection Conference. Tucson.
- Fisch, G; Marengo, J. A; Nobre, C. A; 2014. *Clima da Amazônia*. CPTC/INPE, Brasil, 2014. Disponível em <https://www.ecodebate.com.br/2014/11/13/clima-da-amazonia-por-gilberto-fisch-jose-a-marengo-e-carlos-a-nobre/>. Acesso 17/01/2020.
- Global Atmospheric Inc. 1998. *Lightning Position & Tracking Sensor IV, Installation, Operation, and Maintenance Manual*. Global Atmospheric, Inc.
- Herrera, J. Younes, C. Porras, L. 2018. Cloud to ground lightning activity in Colombia: A 14-year study using lightning location system data. *Atmospheric Research*, vol 203, pp 164-174.
- <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.12.009>
- Kochtubajda, B; Burrows, W. R, Power, B. E. 2007. An Analysis of Large Current Lightning Flashes Across Canada: 1999-2006. *Journal of Lightning Research*, vol 3. Disponível em: www.jolr.org. Acesso em 15/01/2020.
- Lyons, W. A; Uliasz, M; Nelson. T. 1998. Large peak current cloud-to-ground lightning flashes during the season months in the contiguous United States. *Monthly Weather Review*. 126.
- Morales, C. A., and E. N. Anagnostou. 2001. Extending the Capabilities of High-Frequency Rainfall Estimation From Geostationary Based Satellite Infrared via a Network of Long-Range Lightning Observations. *American Meteorological Society* 4 (2): 141–159.
- Morales, C. 2003. *Continuous Thunderstorm Monitoring: Retrieval of Precipitation Parameters from Lightning Observations*. Tese de Doutorado. Connecticut. University of Connecticut.
- Morales, C. A., J. R. Neves, and E. M. Anselmo. 2011. Sferics Timing and Ranging Network – STARNET: Evaluation over South America. XIV International Conference on Atmospheric Electricity, Rio de Janeiro.
- NASA. National Aeronautics and Space Administration. 2019. *GOES-R Series Data Book*. Maryland.
- Orville, R. E. 1994. Cloud-to-Ground Lightning Flash Characteristics in the Contiguous United States: 1989-1991. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 4, No. D5, 10,833– 10,841.
- Pereira, C. S., Aleixo, J. G. E, Rocha, E. J. P., Simões Neto, B. 2008. A statistical approach to the determination of the lightning detection efficiency of the SIPAM lightning detection network. GROUND 2008. Florianopolis.
- Pereira, C. S. Almeida, A. C. Rocha, B. R. P. Frota, M. W. 2015. Transmission line vulnerability to lightning over areas of dense rainforest and large rivers in the Amazon region. *Electric Power Systems Research*, vol 119, pp 287-292.
- <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2014.10.001>
- Pinto Jr, O. 1997. Are equatorial negative lightning flashes more intense than those at higher latitudes? *Journal of Solar-Terrestrial Physics*. vol 59, no 15.
- Pompeu, M. M; Souza, J. R. S; Almeida, A. C; Queiroz, J. C. B; Silva, C. C. S; Ribeiro, W. M. N. 2018. Lightning Characteristics Associated to Severe Storm Cases, Which Impacted the Cities of Belem and Santarem, in Amazonia. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v 11, n 04, pp 1202-1214.
- <http://dx.doi.org/10.26848/rbgf.v11.4.p1202-1214>
- R Core Team. 2020. R: A language and environment for statistical computing". R Foundation for Statistical Computing, Vienna.
- Rakov, V. A, Uman, M. A. 2007. *Lightning: Physics and Effects*. Cambridge. University Press. Cambridge.
- Rocha, B. R. P, Souza, J. R. S., Costa, J. M. Costa. 1996. Electric and Magnetic Fields from Lightning in Belem. *Anais do II Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo*, pp. 55-58.
- Rocha, B. R. P. Rocha, Souza, J. R. S, Silva, I. M. O., Costa, J. M. 1997. Precipitation Estimates from an Electromagnetic Lightning Detector Data in Radiofrequencies. *Proceedings of the International Microwave and Optoelectronics Conference*, Vol. 2, pp. 655-659, Natal.
- Santos, A. P. P. Souza, J. R. S. Souza, E. B. Carmo. A. M. C. Ribeiro, W. M. N. 2014. Electric systems failures produced by CG lightning in Eastern Amazonia. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v 29, pp 31-40.
- <http://dx.doi.org/10.1590/0102-778620130028>
- Silva, C. C. S; Souza, J. R. S; Almeida, A. C; Queiroz, J. C. B; Pompeu, M. M; Ribeiro, W. M. N. 2018. Previsão de Raios Através de

- Índices Termodinâmicos da Atmosfera, na Região de Belém. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v 11, n 04, pp 1186-1202. <http://dx.doi.org/10.26848/rbgf.v11.4.p1186-1201>
- Sisniega, D. P. Garcia, M. M. Menendez, S. F. Soriano, L. R. Dávila, F. P. 2018. Evidence for the influence of land uses and soil types on cloud-to-ground lightning activity in Asturias (Spain). *Atmospheric Research*, vol 203, pp 62-67. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.11.025>
- Soula, S. Kasereka, J. K. Georgis, J. f. Barthe, C. 2016. Lightning climatology in Congo Basin. *Atmospheric Research*, vol 179, pp 304-319. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.04.006>
- Souza, J. R. S; Rocha, B. R. P; Costa, J. M; Dutra, S. L. G. 1997. Características dos Eventos de Raios Nuvem-Solo e sua Distribuição em Área no Leste do Pará. *Anais do V Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica*, Vol. 2, pp. 1152-1155, São Paulo.
- Souza, J. R. S; Rocha, B. R. P; Carrera, G. T. 1999. CG-Lightning Observation (and applications) Around Belém During the 1995-1998 Period. *Proceedings of the V International Symposium on Lightning Protection*, Vol. 1, pp. 17-21, São Paulo.
- Uman, M. A. 2001. *The Lightning Discharge*. Dover Editions.
- Zhang, W. Zhang, Y. Zheng, D. Xu, L. Lyu, W. 2018. Lightning climatology over the northwest Pacific region: An 11-year study using data from the World Wide Lightning Location Network. *Atmospheric Research*. vol 210, pp 41-57. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.04.013>