



# Revista Brasileira de Geografia Física

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



## Relação Entre o Total de Raios e os Raios Nuvem-Solo Sobre o Leste da Amazônia

Giordani Rafael Conceição Sodré, e-mail: [giordani@ufpa.br](mailto:giordani@ufpa.br) (autor correspondente) - Universidade Federal do Pará, Douglas Batista da Silva Ferreira- Instituto Tecnológico Vale, Juarez Oliveira Ventura- Instituto Tecnológico Vale / Universidade Federal do Pará, Cláudia Priscila Wanzeler Costa-Instituto Tecnológico Vale, Everaldo Barreiros Souza-Universidade Federal do Pará, Bergson Cavalcanti Moraes-Universidade Federal do Pará

Artigo recebido em 06/06/2019 e aceito em 18/01/2020

### RESUMO

Neste estudo foi realizada uma análise comparativa da ocorrência de raios do tipo nuvem-solo (NS), medidos por sensores em superfície e o total de raios (NS e intra-nuvem - IN), derivados de sensoriamento remoto por satélite, objetivando estabelecer uma proporção dos raios NS entre ambos os Lightning Location System (LLS) para o leste da Amazônia. Foram utilizados dados da STARNET e do banco de dados LRTMS (OTD/LIS). A metodologia de análise consistiu no cálculo da Razão Z, da Proporção de Incidência de Raios NS e da Correlação de Pearson. Adicionalmente também foi realizada uma investigação sobre a relação da quantidade de raios NS em função da altitude do relevo. Os resultados apontaram que a incidência de raios NS tem uma oscilação média mensal de 7,5% a 20,4% do total de raios medidos por sensoriamento remoto e a quantidade varia de acordo com o tipo de superfície, sendo que na região oceânica observou-se baixa incidência de raios NS, nas regiões mais próximas ao litoral observou-se no primeiro semestre os maiores valores da proporção de incidência de raios NS, enquanto que no interior do continente, o máximo de atividade elétrica do tipo nuvem-solo apresenta maiores percentuais durante o segundo semestre. Também foi constatado que o relevo não altera a proporção de incidência dos raios NS, uma vez que não foi encontrada uma relação direta somente com a altura do relevo.

Palavras-chave: Proporção de Raios, Razão Z, Relevo.

## Relationship Between Total Lightning and Cloud-To-Ground Lightning in Eastern Amazonia

### ABSTRACT

An analysis of the occurrence of cloud-to-ground (CG) lightning, measured by ground-based sensors, and total lightning (CG and intra-cloud (IC) lightning), detected by satellite remote sensing, was performed in this study to compare the proportion of CG lightning between the two lightning location systems (LLS) in Eastern Amazonia. STARNET and LRTMS (OTD/LIS) data were used. The method of analysis consisted of calculating the Z ratio, the proportion of incidence of CG lightning and the Pearson correlation coefficient. Furthermore, the variation in the number of CG lightning flashes as a function of terrain altitude was also investigated. The results indicated that the mean monthly CG lightning incidence ranges from 7.5% to 20.4% of the total lightning measured by remote sensing and that the number of CG lightning flashes varies according to surface type. More specifically, the oceanic region showed low CG lightning incidence, with the regions closest to the coast having the highest proportion of CG lightning incidence in the first semester; in contrast, the CG electrical activity peaked inland during the second semester. The results also showed that the terrain had no effect on the proportion of CG lightning incidence because no direct relationship with terrain height alone was found.

Keywords: Proportion, Z Ratio, Terrain Altitude.

## Introdução

Em ciências atmosféricas, as pesquisas que abordam a incidência de raios nuvem-solo (NS), buscam compreender detalhes como a variabilidade espaço-temporal, a densidade, bem como a relação com acidentes envolvendo pessoas e bens materiais. Neste sentido, a partir da década de 1970, começaram a ser utilizados os sistemas de detecção de raios (*Lightning Location Systems - LLS*) incluindo sensores remotos, técnicas e instrumentos (Cummins e Murphy, 2009). Mais recentemente, foram instaladas LLS em vários países. No Brasil, uma das principais fontes de informações em superfície é a *Sferics Timing And Ranging NETwork* (STARNET), que possui sensores com autonomia para cobrir a maior parte do território brasileiro (Morales et al., 2003; Anagnostou e Chronis, 2004; Leal, 2014).

Em termos de sensoriamento remoto, o lançamento do sensor Optical Transient Detector (OTD) em abril de 1995, permitiu as primeiras estimativas globais de relâmpagos por satélites, que captavam os raios intra-nuvem (IN) e NS. Em 2000, o OTD foi substituído integralmente pelo sensor Lightning Imaging Sensor (LIS), parte do projeto *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM), o qual teve vida útil até 2015 (Blakeslee et al., 2014).

Apesar dos avanços nos LLS utilizando os sensores de superfície e detecção remota, ambos apresentam limitações. Por exemplo, as antenas de recepção em superfície, mesmo apresentando maior eficiência na identificação de raios NS, revelam discrepâncias na localização espacial, além de apresentarem um pequeno período de amostragem para o Brasil, principalmente na região amazônica, cuja densidade de dados meteorológicos é escassa. Em relação aos sensores orbitais, sem o auxílio de outra base de dados, a determinação precisa da quantidade de raios NS é improvável, uma vez que detectam tanto os raios IN quanto os NS (Christian et al., 2003; Leal, 2014).

Assim, com o objetivo de obtenção de um maior período de dados de raios NS a partir das informações de sensoriamento remoto, torna-se necessário avaliar a relação entre os diferentes LLS usando métodos que permitem identificar a proporção de raios que, de fato, atingem o solo (NS) utilizando tanto as informações por sensoriamento remoto (representando o total observado, IN+NS), quanto os LLS em superfície

(representando apenas os raios NS). Portanto, o principal foco deste estudo é estabelecer uma proporção entre as medidas de raios NS pela rede de sensores em superfície, e o total de raios IN+NS por sensoriamento remoto para algumas regiões no leste da Amazônia. Adicionalmente, será realizada uma análise de correlação entre a incidência de raios e os dados topográficos regionais, visando encontrar uma analogia entre áreas com relevo mais acentuado e a taxa de raios NS.

A partir daqui os dados detectados por satélites serão chamados de total de raios, representando a ocorrência IN e NS, enquanto que os registros pelos LLS em superfície serão descritos como raios NS, relativos apenas aos raios que atingem o solo.

## Material e métodos

### Área de Estudo

A área selecionada para esta pesquisa é o leste da Amazônia, mais precisamente a região compreendida entre o sudeste do estado do Pará o centro-norte do estado do Maranhão, escolhida por apresentar alta variabilidade de incidência de raios NS (Ribeiro, 2014; Pompeu, 2017), bem como pelo fato de possuir diferentes características físicas, como o relevo acentuado, rica hidrografia, além de uma região costeira banhada pelo Oceano Atlântico equatorial (IBGE, 2017), que presumivelmente interferem na distribuição espacial de raios, sendo esta a hipótese da pesquisa. Tais regiões estão delimitadas entre as longitudes de 052°O e 044°O e as latitudes de 07°S e 02°S, subdividida em sete células de 2,5°x 2,5°, conforme descrito na Figura 1.

### Dados de Sensores em Superfície

Os dados de raios NS foram obtidos junto ao *Sferics Timing And Ranging NETwork* (STARNET) (Morales et al., 2011), que é uma LLS instalada na região tropical, incluindo sensores na África e na América Latina. No Brasil existem 9 antenas, localizadas em Manaus, Belém, Fortaleza, Ilhéus, Brasília, Campo Grande, Cachoeira Paulista, São Paulo e São Martinho (Dentel, 2013). As antenas receptoras estão sincronizadas a um sistema de GPS (Global Positioning System) que operam em baixa frequência, VLF (*Very Low Frequency*), detectando vibrações entre 7 – 15 kHz, emitidos por descargas elétricas na atmosfera. Essas vibrações ou ruídos são denominados *sferics* e podem alcançar milhares de quilômetros nesse intervalo de frequência, se propagando no guia de

onda delimitado pela superfície da terra e pela ionosfera, a propagação da onda atmosférica gerada pelo raio (*sferic*) é detectada por vários sensores ao mesmo tempo. Tais informações, por sua vez, são enviadas a um computador central, no qual são submetidas a um algoritmo de seleção que realiza o cálculo da intensidade desta onda (para eliminar possíveis ruídos que não sejam raios) e por meio da intensidade do sinal captado pelas torres e

com o auxílio do sistema de GPS, é determinada a localização aproximada da origem do sinal (onde o raio atingiu o solo) (Lee, 1986; Morales et al., 2003). A eficiência de detecção (ED) do ponto de incidência de um raio NS é de aproximadamente 60%, que foi considerado na metodologia.

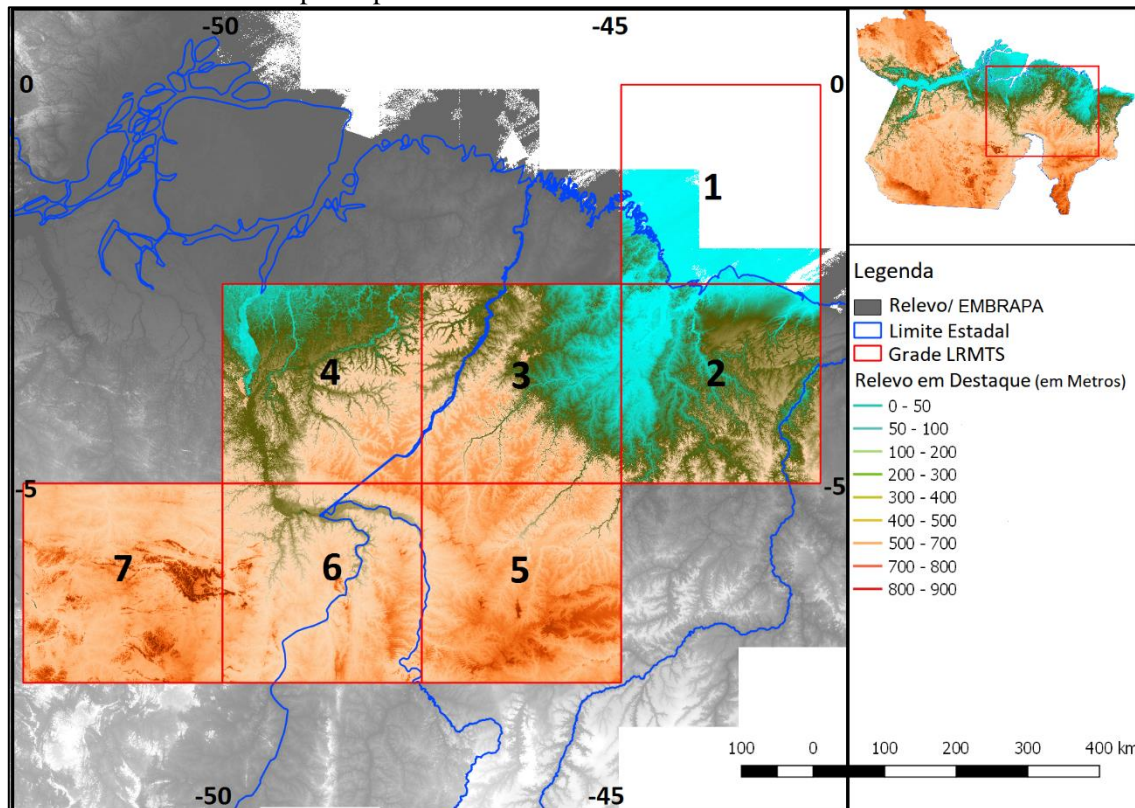


Figura 1: Localização da área de estudo, enfatizando sete células que representam diferentes características físicas de terreno na Amazônia oriental.

Os dados da STARNET foram utilizados neste trabalho como representativos da incidência de raios NS. Para a Amazônia, a base de informa es está disponível desde 2008. No entanto, como os dados são de acesso limitado, foi disponibilizado apenas o período de 2008 a 2013 durante o desenvolvimento deste estudo.

#### Dados de Sensoriamento Remoto por Satélite

Para obten o das informa es do total de raios, foram usados os dados integrados a partir do sensor OTD (*Optical Transient Detector*) e LIS (*Lightning Imaging Sensor*).

O OTD, lançado em 1995, foi o primeiro sensor  tico a permitir estimativas globais de raios, cuja missão durou apenas 5 anos, sendo desativado

no início do ano de 2000 e substituído integralmente pelo sensor LIS (Blakeslee et al., 2014).

O LIS agregou melhorias em termos de detec o da frequência de feixe de luminosidade associados ao total de raios e permaneceu ativo entre os anos 2000 a 2015. O LIS contorna o planeta em uma órbita terrestre baixa de 350 km. A inclina o da órbita   de 35 , permitindo observar a atividade total de raios em toda a região tropical do globo (Christian et al., 1992).

O sensor LIS captou imagens  ticas que foram usadas para identificar a atividade elétrica na atmosfera, detectando mudanças momentâneas no brilho das nuvens   medida que são iluminadas por relâmpagos (Christian et al., 1992). Devido a sensibilidade e alcance dinâmico do sensor, tornou-

se possível a detecção de relâmpagos, mesmo na presença de outras formas de brilho, como as nuvens iluminadas pelo sol. Assim, os dados do OTD/LIS possuem uma precisão média de 78% de detecção, sendo uma opção para a utilização de informações que caracterizam a taxa total de raios (Christian et al., 1999), uma vez que representam os valores medidos por unidade de área. Assim, a unidade de medida das informações é dada em raios/km<sup>2</sup>.

Entre os produtos do total de raios gerados a partir do OTD/LIS foi utilizado nesta pesquisa o conjunto “*Low Resolution Monthly Time Series*” (LRMTS), cujas informações estão disponíveis em uma resolução espacial de 2,5° de latitude e longitude, em uma série temporal mensal, para o período compreendido entre 08/1995 e 12/2014 (Cecil et al., 2012).

Como o conjunto de dados LRMTS possui uma baixa resolução espacial (pontos de grade em torno de  $77 \times 10^3$  km<sup>2</sup>), há uma limitação na detecção espacial de pequenos sistemas convectivos. No entanto, a resolução espectral é aproximadamente 5 km, o que permite detectar os pulsos luminosos com precisão de 69% durante o dia e 88% durante a noite (Cecil et al., 2014). Normalização dos dados STARNET e OTD/LIS

Conforme mencionado anteriormente, a base de dados LRMTS representa uma taxa do total de raios, cujas informações estão dispostas em pontos de grade e a unidade de medida é dada por unidade de área.

Por outro lado, a base de dados STARNET é derivada de um receptor de pulsos eletromagnéticos e não possui resolução espacial geográfica, uma vez que as informações são relativas aos pontos de incidência dos raios NS.

Deste modo, devido a forma de detecção dos sensores LRMTS e STARNET serem diferentes, foi necessária a normalização dos dados para que pudessem ser comparados. A normalização consistiu em criar um arquivo de saída para dados STARNET na mesma unidade espacial e temporal das informações por sensoriamento remoto. Para isso, grades de 2,5° x 2,5° (Figura 1) foram criadas para a região de estudo, de modo que a quantidade diária de raios NS detectados pelo sensor STARNET foi dividida pela área equivalente ao ponto de grade ( $77 \times 10^3$  km<sup>2</sup>), transformando os dados adimensionais na taxa de raios/km<sup>2</sup>/mês, idêntica ao formato LRMTS, tornando possível a comparação de ambas as bases de dados. Logo, os resultados serão

apresentados considerando a taxa da incidência de raios para ambas as bases de dados.

#### Dados Topográficos

Para investigar a relação de incidência de raios com o relevo foram utilizados os dados altimétricos de superfície da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), que fez parte do projeto de cooperação entre a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), NGA (*National Geospatial-Intelligence Agency*), DLR (Agência Espacial Alemã) e ASI (Agência Espacial Italiana) com o objetivo de gerar um Modelo Digital de Elevação (MDE) da Terra, utilizando a técnica de interferometria (Crepani e Medeiros, 2005). O Projeto SRTM ocorreu entre o período de 11 a 22 de fevereiro de 2000, a bordo da Space Shuttle Endeavour, em uma altitude de voo de 233 km e uma inclinação de 57°. Um conjunto composto por duas antenas coletou dados que permitiram a avaliação do perfil de altitude da superfície terrestre, para criação de modelo digital tridimensional entre as latitudes 60°N e 58°S, com resolução espacial de 90 metros (Crepani e Medeiros, 2004).

Os pesquisadores da Embrapa Monitoramento por Satélite realizaram a correção e padronização, eliminando falhas, sombras e distorções sobre os dados brutos do SRTM. Assim, os dados corrigidos e validados para o Brasil estão disponíveis no endereço eletrônico de monitoramento por satélite da Embrapa (Moura et al. 2006).

#### Métodos e Procedimentos de Análise

Para este estudo, foi utilizado o período de 2008 a 2013 (6 anos), comum tanto para os dados por sensoriamento remoto, quanto para os sensores em superfície da STARNET.

Devido à baixa resolução no conjunto de dados por sensoriamento remoto, foram propostas sete regiões definidas por células de 2,5° de latitude e 2,5° de longitude, equivalente a uma área de, aproximadamente,  $77 \times 10^3$  km<sup>2</sup> cobrindo a região de interesse (Figura 1) e possibilitando o cálculo normalizado entre o total de raios (LRMTS) e os raios NS (STARNET).

A metodologia empregada para investigar a relação do total de raios com os raios NS consiste no cálculo da razão Z, que foi originalmente proposto por Pierce (1970) e utilizado por Prentice e Mackerras (1977) para avaliar a eficiência de detecção dos primeiros LLS

e indicar a relação entre a densidade do total de raios e a densidade de raios NS baseando-se em observações entre as latitudes de 69°N e 37°S.

A razão Z fornece informações sobre a atividade elétrica em tempestades e pode ser usada para investigar como os centros de carga estão dispostos nas nuvens. Além disso, o cálculo da Razão Z também é importante para estudos que abordam a relação entre a taxa de relâmpagos e a severidade da tempestade (MacGorman et al., 1989; Williams et al., 1999; Buechler et al., 2000), produção de componentes atmosféricos como NO<sub>x</sub> (Chameides et al., 1977; Pickering et al., 1998; Rakov e Uman, 2003) e a contribuição dos raios para o circuito elétrico global (Rycroft et al., 2000; Markson, 2007; Williams, 2007).

Metodologia similar a este trabalho também foi utilizada por Boccippio et al. (2001), que analisaram quatro anos de observações do OTD e National Lightning Detection Network (NLDN), combinados para determinar a distribuição geográfica climatológica de raios, considerando o total de raios e raios NS sobre a porção continental dos Estados Unidos, utilizando a Razão Z. De acordo com os autores, o tipo de tempestade, a morfologia do terreno e a estrutura espacial das células convectivas podem ser dominantes sobre os fatores ambientais na determinação local da Razão Z.

Assim sendo, a metodologia proposta neste estudo segue os mesmos preceitos de Prentice e Mackerras (1977), de modo que, o cálculo da Razão Z (Equação 1) foi aplicado de acordo com a Tabela 1, considerando tanto os dados de sensoriamento remoto quanto as observações do total de raios.

$$Z = \frac{L_{TOTAL} - L_{CG}}{L_{CG}} \quad (1)$$

Onde:

Z – Relação entre a densidade do total de raios e a densidade de raios NS;

L<sub>TOTAL</sub> – Total de raios por sensoriamento remoto (IN+NS);

L<sub>CG</sub> – Raios nuvem-solo.

De modo que, Z > 0.

A proporção mensal de incidência entre L<sub>TOTAL</sub> e L<sub>CG</sub> foi calculada para cada uma das sete células de estudo (Figura 1), conforme a Equação 2:

$$P = \frac{L_{CG}}{L_{TOTAL}} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

P – Proporção entre o total de raios e raios NS;

L<sub>CG</sub> – Raios NS;

L<sub>TOTAL</sub> – Total de raios (IN+NS).

Para o cálculo da Razão Z e de P foi considerado a ED, para ambas as bases de dados, onde a ED utilizou o valor médio de 78% para o LRMTS devido a resolução temporal mensal dos dados e a precisão das informações ser diferente entre os horários do dia (69% durante o dia e 88% durante a noite), e 60% para a STARNET.

Em seguida, foi avaliado para as sete células o grau de correlação entre resultados da Razão Z e da proporção (P) de ocorrência associada a altitude do relevo, a fim de analisar a existência de uma relação direta entre os fatores orográficos e o quantitativo de raios NS. Para tal, foi utilizado o método de Correlação de Pearson (Equação 3), onde ρ assume valores entre -1 e +1, onde ρ = +1 significa uma correlação positiva perfeita entre as duas variáveis, ou seja, se uma aumenta a outra também aumenta. Se ρ = -1 significa uma correlação negativa perfeita entre as duas variáveis, isto é, se uma aumenta a outra diminui. Quando ρ = 0 significa que as duas variáveis não dependem linearmente uma da outra. Os sinais positivo e negativo indicam a direção e a intensidade da correlação (Pacheco et al., 2012).

O coeficiente de Correlação de Pearson é calculado de acordo com a Equação 3 e a Tabela 2 ilustra o grau de correlação entre as variáveis analisadas.

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{cov(x,y)}{\sqrt{var(x) \cdot var(y)}} \quad (3)$$

Onde: x<sub>1</sub>, x<sub>2</sub>, ..., x<sub>n</sub> e y<sub>1</sub>, y<sub>2</sub>, ..., y<sub>n</sub> são os valores medidos entre as variáveis.

Tabela 1: Parâmetros do cálculo de Z adaptados para esta pesquisa.

Parâmetros	Prentice e Marckerras (1977)	Adaptação para esta pesquisa
Z	Densidade de raios (IN ou NS)	Densidade de raios (IN ou NS)
L <sub>TOTAL</sub>	Total de raios sobre uma região (Observações <i>in loco</i> )	Total de raios sobre uma região (Observações por Satélite)
L <sub>CG</sub>	Raios NS por sensores terrestres	Raios NS por sensores terrestres (STARNET)

Tabela 2: Grau de Correlação de Pearson.

Coefficiente de Correlação	Correlação
$\rho = 1$	Perfeita Positiva
$0,8 \leq \rho < 1$	Forte Positiva
$0,5 \leq \rho < 0,8$	Moderada Positiva
$0,1 \leq \rho < 0,5$	Fraca Positiva
$0 < \rho < 0,1$	Ínfima Positiva
0	Nula
$-0,1 < \rho \leq 0$	Ínfima Negativa
$-0,5 < \rho \leq -0,1$	Fraca Negativa
$-0,8 < \rho \leq -0,5$	Moderada Negativa
$-1 < \rho \leq -0,8$	Forte Negativa
$\rho = -1$	Perfeita Negativa

Fonte: Adaptado de Sodré et al. (2015)

## Resultados

### Relação entre raios NS e o total de raios

A Tabela 3 mostra a média mensal de 6 anos (2008 a 2013) da Razão Z e da Proporção de Incidência (P) para as sete células de estudo. A relação entre Z e P é claramente inversa, dada a diferença de cálculo entre as metodologias, onde quanto maior a quantidade de raios NS, menor o valor da Razão Z e maior o valor de P. Assim, foi possível evidenciar diferenças na distribuição mensal de raios NS entre as sete células de estudo.

Para encontrar um padrão médio de raios NS foi realizado para cada mês, o cálculo de P para as sete células. Os resultados são evidenciados

graficamente na Figura 2, onde foi constatado que: para a célula 1, que abrange a região oceânica em quase sua totalidade, a incidência de raios é baixa, com média mensal de 4,5% de raios NS em relação ao total de raios. Na célula 2, região próxima ao litoral e com baixa altitude do relevo, ocorre o maior percentual mensal de proporção de incidência de raios entre as sete células (média de 17,9%), com máximo de 35,1% de raios NS durante o mês de maio. Nas células 2 a 4, os primeiros meses do ano caracterizam-se pelos maiores percentuais de P no trimestre de março a maio, com média de 27,6%, 22,7% e 22,6%, respectivamente para as células 2, 3 e 4. As células 5 e 6 mostram uma variabilidade diferente das

demais, onde os valores da P de raios NS são significativamente inferiores e as diferenças ao longo dos meses do ano são menores em relação as células 2 a 4. De modo geral para ambas as células, os meses de fevereiro a junho e de outubro a dezembro são observados os maiores percentuais de raios NS (acima de 10%). Na célula 7, onde a altura do relevo é mais acentuada, a variação mensal de P mostra uma tendência positiva no decorrer dos meses do ano, sendo em setembro o valor percentual máximo (23,5%).

Considerando os valores médios para as células 2 a 6, a maior proporção de raios NS ocorre no primeiro semestre do ano. Na célula 1, os

valores de P mais próximos a zero denotam baixa proporção de raios NS em relação ao total de raios, além da pequena variabilidade mensal, não apresentando diferenças significativas na sazonalidade. Por outro lado, na célula 7, o segundo semestre é aquele com maior percentual da proporção de raios NS em relação ao total.

A Figura 3 exemplifica a condição descrita acima, pela comparação da variação mensal da incidência de raios entre as células 1 (oceano), 2 (litoral) e 7 (Continente distante do litoral). Vale ressaltar que a célula 7 apresenta altura do relevo mais acentuada em relação as demais abordadas neste estudo, de acordo com a Figura 1.

Tabela 3: Média mensal de 6 anos (2008 a 2013) da Razão Z e da Proporção de incidência de raios (P) para as sete células de estudo.

Meses	1		2		3		4		5		6		7	
	Z	P	Z	P	Z	P	Z	P	Z	P	Z	P	Z	P
<b>JAN</b>	42,86	2,28	3,78	20,92	8,09	11,00	7,27	12,09	5,87	14,55	6,51	13,31	6,50	13,33
<b>FEV</b>	12,03	7,67	1,10	47,60	2,96	25,23	2,63	27,58	3,17	23,96	2,92	25,50	3,67	21,40
<b>MAR</b>	17,18	5,50	1,39	41,87	2,07	32,61	2,01	33,25	2,95	25,33	2,80	26,31	3,63	21,61
<b>ABR</b>	11,82	7,80	0,30	76,79	0,96	51,03	0,93	51,70	2,88	25,80	1,77	36,12	2,58	27,90
<b>MAI</b>	12,29	7,53	0,71	58,45	2,32	30,11	2,57	28,04	3,20	23,79	1,95	33,86	3,16	24,05
<b>JUN</b>	6,52	13,30	1,15	46,45	5,74	14,84	4,34	18,72	4,71	17,51	2,93	25,46	4,21	19,18
<b>JUL</b>	3,01	24,93	1,83	35,30	1,99	33,42	3,26	23,47	12,05	7,66	5,80	14,70	2,23	30,93
<b>AGO</b>	29,87	3,24	4,49	18,23	6,95	12,59	9,99	9,10	17,37	5,44	6,42	13,47	2,50	28,61
<b>SET</b>	39,75	2,45	4,76	17,35	19,10	4,98	9,32	9,69	15,66	6,00	4,29	18,91	1,56	39,10
<b>OUT</b>	14,16	6,60	6,66	13,06	12,44	7,44	9,49	9,54	5,22	16,08	3,09	24,45	2,63	27,52
<b>NOV</b>	21,54	4,44	2,34	29,95	5,11	16,37	5,62	15,10	2,52	28,44	2,17	31,54	2,28	30,50
<b>DEZ</b>	31,64	3,06	3,14	24,18	5,81	14,68	4,02	19,94	3,03	24,80	1,94	34,04	2,26	30,67

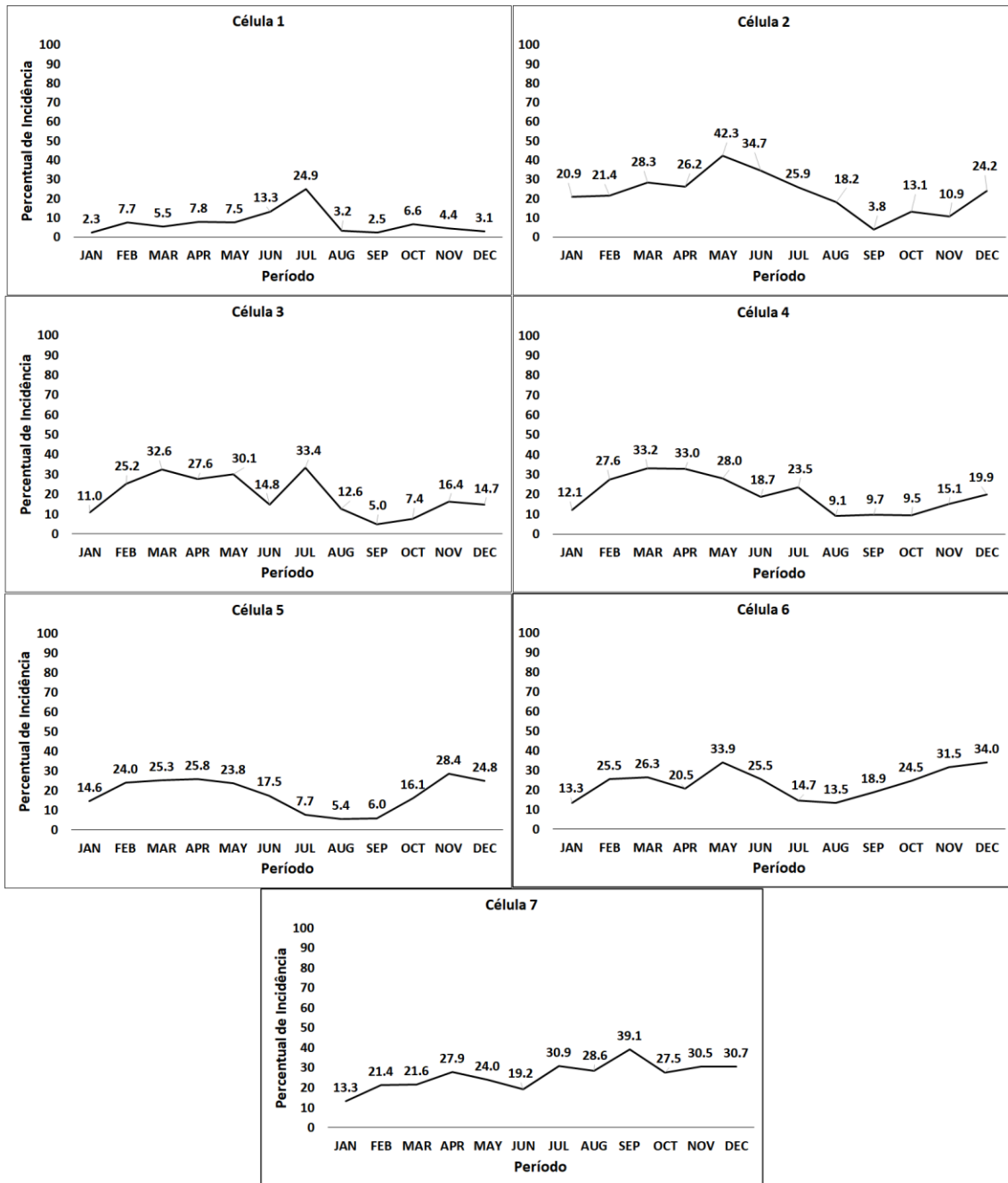


Figura 2: Proporção de incidência de raios para as 7 células de estudo.



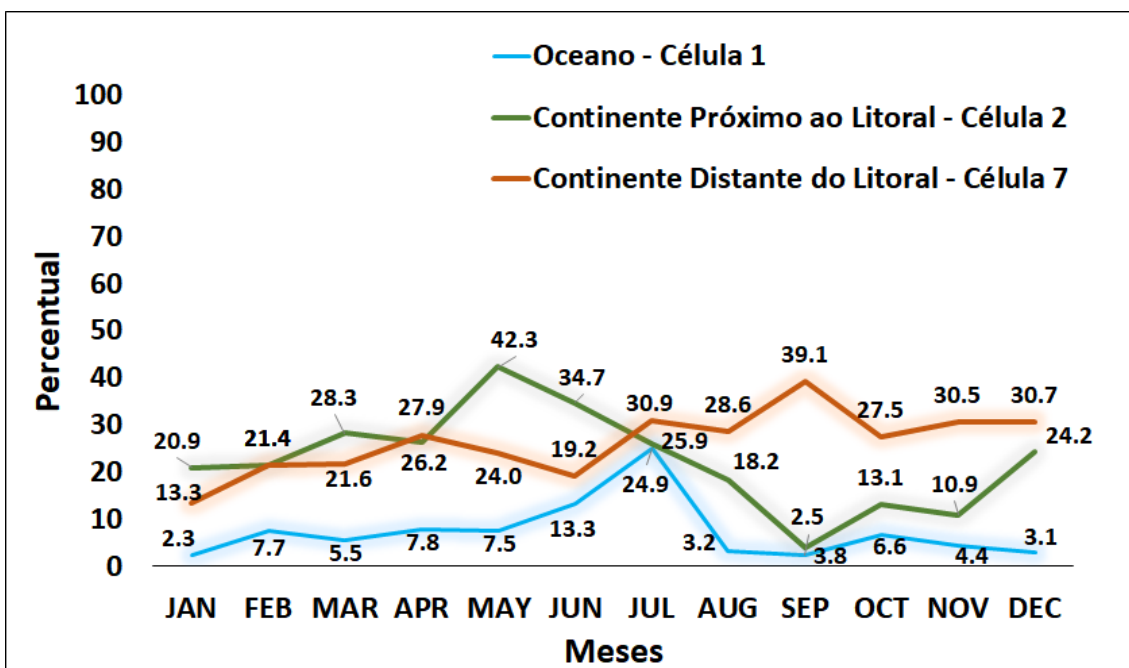


Figura 3: Proporção da taxa de incidência de raios NS pelo total por km<sup>2</sup> em diferentes pontos geográficos: oceano, continente próximo ao litoral e continente distante do litoral.

A partir do cálculo da média mensal da taxa de incidência de raios NS, dada por P considerando as sete células, foi encontrado uma oscilação de 7,5% a 20,4%. No geral, a proporção da taxa de incidência da quantidade de raios NS nas áreas de estudo é de aproximadamente 12,8%. Em comparação com Gomes (2003), cujos resultados apontaram que a proporção de raios NS em relação ao total de raios oscila entre 20% e 30%, os percentuais encontrados para o presente estudo mostram valores ligeiramente inferiores, embora tenha sido observado células com proporção dentro do intervalo esperado. Logo, para a região estudada a quantidade de raios NS em relação ao total de uma nuvem é proporcionalmente inferior às

conclusões de Gomes (2003), que realizou estudo similar para a região central do Brasil.

A Figura 4 mostra a relação da taxa de raios com a altura do relevo para cada uma das sete células. O eixo das abscissas mostra em metros a altura máxima do relevo de cada célula, onde é possível notar uma relação entre a taxa de raios e a altura do relevo, pois a medida que aumenta a taxa de incidência de raios por sensoriamento remoto, também aumenta a taxa de raios por sensores em superfície. Considerando a proporção de incidência, a curva representando os dados STARNET consegue capturar a variabilidade espacial detectada pelo LRMTS para as sete células de estudo.

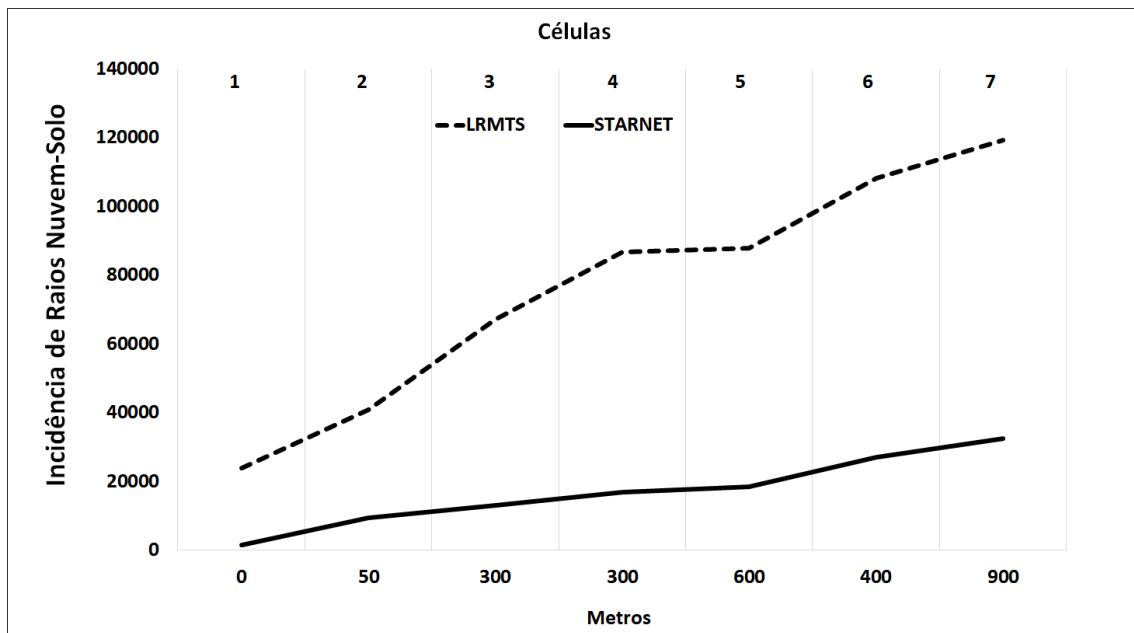


Figura 4: Variabilidade da taxa de incidência de raios LRMTS x STARNET em relação a altitude do relevo. O eixo x representa o pico de altitude de cada uma das sete células analisadas (Célula 1: 0m, Célula 2: 50m, Célula 3: 300m, Célula 4: 300m, Célula 5: 600m, Célula 6: 400m, Célula 7: 900m).

### Análise de Correlação

Nesta seção, foi realizada a correlação entre os resultados obtidos (STARNET, LRMTS, Razão Z e Proporção de Incidência), com a variação do relevo, objetivando investigar a existência de relação direta entre as características do terreno e o quantitativo de raios (Tabela 4). Para cada uma das sete células, foi extraído o ponto de maior altitude, e comparado com o número médio de ocorrência de raios NS. Notou-se que, o quantitativo de raios NS eleva-se com o aumento da altitude. No entanto, o resultado da Razão Z, não mostra correlações significativas entre o relevo a quantidade de raios NS, ou seja, indicando que o padrão de raios NS não se altera com o relevo (Figura 5). Vale ressaltar que, para a célula 1, onde não há influência orográfica, o valor da Razão Z foi superior em relação as demais células, evidenciando há maior quantidade de raios IN sobre o oceano, onde não há centro de carga na superfície para atrair raios.

A aplicação da Correlação de Pearson entre a base SRTM e os dados LRMTS e STARNET

mostrou grau de correlação Perfeito Positivo e Forte Positivo, respectivamente (Tabela 4). Logo, para este tipo de análise, foi constatado que a altitude do relevo apresentou relação com o quantitativo de raios das referidas bases de dados. Em contrapartida, o resultado de ambas correlações do relevo com a Razão Z e com o valor de P, foram classificadas como Moderada Negativa e Fraca Positiva, respectivamente, ou seja, não apresentam um comportamento linear em comparação ao aumento do relevo.

No entanto, como os cálculos foram empregados para uma área espacialmente grande ( $77 \times 10^3 \text{ km}^2$ ) e como a rugosidade do relevo é irregular em cada célula, o valor real de Z não é perfeitamente representado no cálculo da correlação. Uma melhor resposta quanto a relação entre o quantitativo de raios e o relevo poderia ser fornecida se as informações da taxa de raios por sensoriamento remoto apresentassem alta resolução espacial, capaz de reproduzir os detalhes que caracterizam a atividade elétrica regional.

Tabela 4: Média de seis anos dos dados de raios (LRMTS e STARNET), cálculo da Razão Z, Proporção de incidência média de raios por célula e o respectivo nível de altitude do relevo e Correlação de Pearson: LRMTS x Relevo; STARNET x Relevo; Razão Z x Relevo; Proporção (%) x Relevo.

Células	LRMTS	STARNET	Razão Z	Proporção de Incidência de Raios NS (%)	Relevo (metros)
1	789	32	23,4	4,1	0
2	1541	282	4,5	18,3	50
3	2251	296	6,6	13,1	300
4	2893	367	6,9	12,7	300
5	2898	367	6,9	12,6	600
6	3604	561	5,4	15,6	400
7	3918	640	5,1	16,3	900
Parâmetros	Pearson		Correlação		
LRMTS	1,0		Perfeita Positiva		
STARNET	0,9		Forte Positiva		
Razão Z	-0,5		Moderada Negativa		
Proporção (Incidência de Raios NS)	0,4		Fraca Positiva		

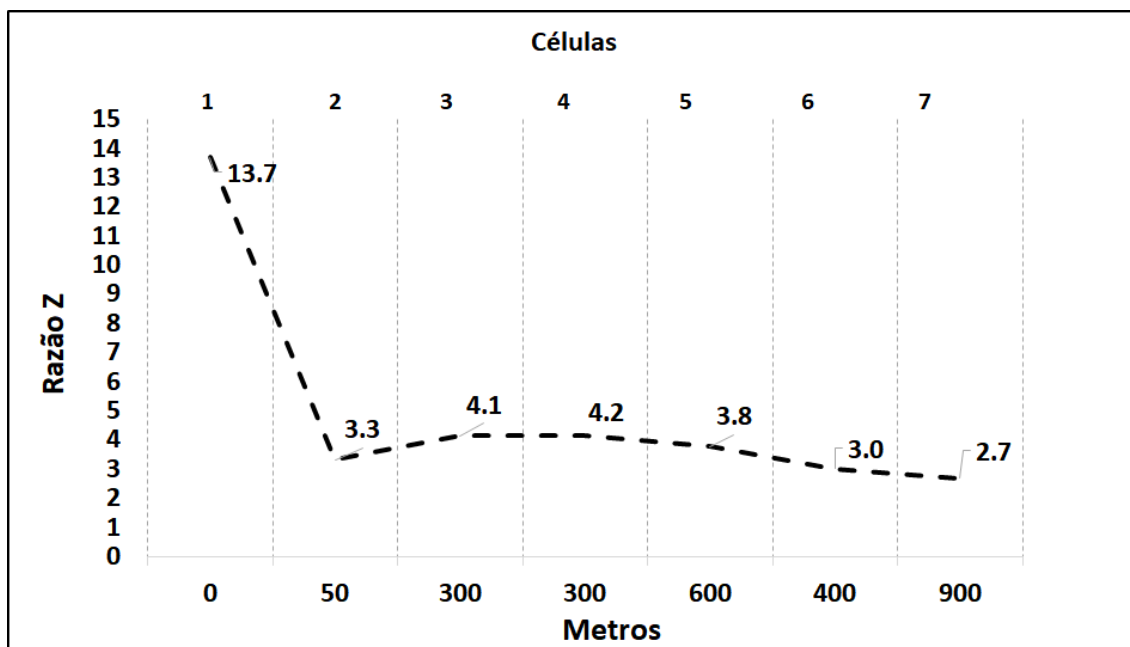


Figura 5: Variação na proporção da Razão Z com a altitude do relevo para cada célula de estudo. O eixo x representa o pico de altitude de cada célula analisada (Célula 1: 0m, Célula 2: 50m, Célula 3: 300m, Célula 4: 300m, Célula 5: 600m, Célula 6: 400m, Célula 7: 900m).

### Discussão

Variabilidade de raios e mecanismos atmosféricos  
 Como descrito anteriormente, os resultados da relação entre o total de raios e os raios NS para algumas áreas no leste da Amazônia mostraram que há uma variabilidade mensal distinta entre as regiões de estudo. A hipótese deste

estudo é de que essa condição pode estar relacionada as diferentes características físicas regionais, bem como o fenômeno meteorológico atuante em cada região.

Uma breve revisão de literatura evidenciou resultados importantes, como os encontrados por Zepka (2005), cujas conclusões apontaram que os raios NS se concentram

principalmente sobre o continente e somente uma reduzida parcela sobre o litoral e o oceano. Segundo Hugh et al. (2003) as áreas continentais, ilhas e regiões costeiras concentram 88% de todas as ocorrências globais de raios NS. Bourscheidt et al. (2003), analisando dados do OTD/LIS sobre países da América do Sul, considerando os anos de 1998 a 2002, encontraram também uma maior incidência total de raios sobre o continente. Similarmente, os resultados encontrados no presente estudo também concluíram que as regiões continentais recebem maior incidência de raios NS.

Em todas as células estudadas, principalmente as mais próximas ao oceano (1 a 4), o mecanismo atmosférico associado ao maior percentual de incidência de raios é a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) (Pompeu, 2017), que também é o principal sistema indutor de precipitação na Amazônia oriental, de dezembro a maio (De Souza et al., 2005; Silva Ferreira et al., 2015). No interior do continente, a ZCIT se faz presente a partir de fevereiro, perdurando até o mês de abril, quando a banda de nebulosidade associada a convergência alcança a posição mais austral (Silva Ferreira et al., 2015). Deste modo, a maior quantidade de raios restringe-se a este período na Amazônia oriental.

Por outro lado, nas células 5 a 7, apesar de também receberem os efeitos da ZCIT, outros fenômenos meteorológicos modulam a sazonalidade pluviométrica na região e, conseqüentemente, a variabilidade da incidência de raios NS, é o caso da Zona de Convergência de Umidade (ZCOU), que por vezes é sucedida pela Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (Carvalho et al., 2004). A ZCOU ocorre a partir da primavera do Hemisfério Sul (setembro a novembro), sendo que a persistência deste sistema acima de 4 dias passa a ser denominada de ZCAS (Pallotta e Nakazato, 2010). Deste modo, a integração destes sistemas atmosféricos é responsável pelo regime de chuvas, principalmente no período de outubro a meados de janeiro (Quadro et al., 2012), o que contribui para o aumento da incidência de raios durante a atuação destes fenômenos atmosféricos.

Portanto, a análise das Figuras 2 e 3 evidenciou que a variabilidade da incidência de raios NS coincide com a atuação dos mecanismos atmosféricos de mesoescala e grande escala e, conseqüentemente, da sazonalidade dos padrões pluviométricos regionais. De acordo com Pompeu (2017), a incidência de raios na Amazônia oriental

está diretamente relacionada aos fenômenos que modulam o regime pluviométrico regional.

#### Relação entre Raios NS e o Relevo

A relação de incidência de raios e relevo foi estudada desde o início dos primeiros LLS. Reap (1986) analisou cerca de 2 milhões de raios NS para o oeste dos Estados Unidos, ocorridos durante os verões de 1983 e 1984, e concluiu que à medida que a aumenta altitude, cresce a densidade diária de raios.

Mackerras e Darveniza (1994) realizaram observações em 14 diferentes áreas entre as coordenadas 60°N e 27°S e contestaram a relação direta da altitude do relevo com a quantidade de raios. Em estudo similar, Mackerras et al. (1998) aplicaram uma série de correlações e ratificaram as análises prévias, não encontrando um padrão entre a incidência de raios e a orografia. Em contrapartida, Gomes (2003) analisou a variabilidade de incidência de raios em relação ao relevo, na região sudeste do Brasil, e concluiu que a altitude é um fator que exerce influência na densidade de raios, mas não de forma predominante ou independente.

Boccippio (2001) discutiu os resultados apresentados por Pierce (1970), Prentice e Mackerras (1977) e Mackerras et al. (1998), que observaram que a Razão Z tende a apresentar valores mais baixos nas latitudes médias e valores mais altos na região tropical. Condição atribuída ao crescimento vertical das nuvens de tempestade, que é maior nos trópicos, indicando que os principais centros de carga negativa mais altos desfavorecem os flashes nuvem-solo. No entanto Boccippio (2001) afirma que devido não ter analisado áreas tropicais, seus resultados não podem refutar estas afirmações.

A hipótese proposta neste estudo é de que as condições meteorológicas para a formação de nuvens convectivas sob a influência do relevo são mais favoráveis na região tropical do que em regiões de latitudes médias, uma vez que a energia disponível para convecção é maior, bem como a disponibilidade de umidade e o cisalhamento do vento. Essa condição típica de latitudes tropicais gera condições favoráveis a formação de nuvens convectivas e uma maior quantidade de raios NS.

Neste sentido, os resultados de Gizaw e Gan (2017) encontraram um padrão no comportamento médio da Convective Available Potential Energy (CAPE) nos Estados Unidos e sul do Canadá, entre os anos de 1979 a 2013, e concluíram que os valores são mais elevados ao longo da região costeira, reduzindo

consideravelmente no interior continente e, principalmente, ao longo de áreas montanhosas. Contrastando este resultado, Gettelman et al. (2002) e Itterly et al. (2016), ao investigar a variabilidade da CAPE na região tropical, concluíram que os valores permanecem elevados ao longo do ano, tanto no litoral como no interior do continente, não podendo ser tomado como o único fator responsável pela convecção profunda e indicativo de maior incidência de raios. Assim, os resultados de ambos os estudos evidenciaram características distintas entre regiões de latitudes médias e tropicais, sendo esta última com condições mais favoráveis ao desenvolvimento de tempestades responsáveis pela incidência de raios.

Os resultados descritos acima podem apresentar uma possível resposta para a determinação da Razão Z em regiões de relevo acentuado, seja em latitudes médias e/ou tropicais, uma vez que em latitudes médias as condições termodinâmicas não favorecem a formação de nuvens convectivas próximas a regiões montanhosas (Gizaw e Gan, 2017), enquanto que na região tropical a energia disponível para a convecção é elevada durante todo o ano, indicando que a formação de nuvens convectivas em torno de um relevo acentuado é maior em baixas latitudes (Gettelman et al., 2002; Itterly et al., 2016), como no leste da Amazônia, abordado neste estudo.

Assim, os resultados obtidos neste estudo mostram que a Razão Z e o valor de P relativo a incidência de raios NS não sofrem alteração significativa em relação à altura do relevo, concordando com os estudos de Mackerras e Darveniza (1994), Mackerras et al. (1998). Todavia, os registros de sensores em superfície e por sensoriamento remoto (Figura 4) mostram que há uma correlação positiva com a orografia, correspondendo aos resultados de Reap (1986).

Analisando a Tabela 4 e a Figura 5, notou-se que a proporção de incidência de raios NS não se altera em função da presença de relevo acentuado. Entretanto, sabendo-se que o fator orográfico pode ser um atenuante na formação de nuvens, atribui-se a pequena flutuação da incidência de raios NS entre diferentes altitudes de relevo, evidenciada na Figura 5, à maior quantidade de nebulosidade formada por convecção orográfica. A partir deste resultado, concluiu-se que ocorre um incremento na incidência de raios NS devido a maior formação de nuvens convectivas e a dinâmica de brisas de vale e montanha, de maneira que a proporção de raios NS em relação ao total de raios, de fato, não se altera.

Portanto, o resultado da variação da Razão Z para as sete células ilustradas na Figura 5, pode estar relacionado a formação de nebulosidade por levantamento, em virtude do relevo mais acentuado nas células 5 a 7. Logo, considerando uma única célula convectiva, o presente estudo não encontrou evidências suficientes para afirmar categoricamente que os fatores orográficos são responsáveis por atrair uma maior quantidade de raios.

## Conclusão

O presente estudo buscou avaliar uma proporção da incidência de raios NS, registrados por sensores em superfície (STARNET), em relação ao total de raios provenientes de sensoriamento remoto por satélite (LRMTS). De modo geral, os dados de raios NS da STARNET representam uma variação mensal de 7,5% a 20,4% em relação ao total estimado por satélite, sendo 12,8% o valor médio mensal para toda a região de estudo.

A sazonalidade da incidência de raios NS apresentou diferenças marcantes entre as sete células analisadas, mostrando características dependentes do tipo de superfície, da sazonalidade, da localização geográfica e fenômeno meteorológico atuante. Resumidamente, na região oceânica observa-se baixa incidência de raios, nas regiões mais próximas ao litoral observam-se maiores valores da proporção de incidência de raios NS no primeiro semestre, enquanto que, no interior do continente, o máximo de atividade elétrica do tipo nuvem-solo passa a apresentar maiores percentuais durante o segundo semestre.

Em relação ao relevo, encontrou-se que nas maiores altitudes há um aumento da taxa de ocorrência de raios NS devido aos processos convectivos relacionados as brisas de vale e montanha. Contudo, foi constatado que o relevo não altera a proporção de incidência dos mesmos, pois a quantidade de raios NS não apresentou uma relação direta somente com a altura do relevo.

A variação dos valores de Z em regiões montanhosas para latitudes médias e regiões tropicais pode estar relacionada às condições termodinâmicas locais, as quais não favorecem a formação de nuvens convectivas próximas a regiões com relevo acentuado em latitudes médias, enquanto que na região tropical a energia disponível para a convecção é elevada durante todo o ano, indicando que a formação de nuvens convectivas em torno de um relevo acentuado é maior na região tropical, como no leste da Amazônia, foco deste estudo.

Como os cálculos abrangem uma grande área geográfica, a variação da altura do relevo em uma única célula pode interferir no real valor da Razão Z, uma vez que a distribuição orográfica não é homogênea.

Para estudos futuros sobre a proporção de raios NS sugere-se a utilização de dados do total de raios com alta resolução espacial. Tais informações também seriam fundamentais para o cálculo mais preciso da Razão Z em função da altitude do relevo. Recomenda-se a utilização de dados de outras redes de detecção com diferentes técnicas de medição, maiores resoluções espaciais e temporais, além de focar outras regiões, como aquelas com área mais urbanizada e outros fatores que favoreçam a convecção para formação de nebulosidade causadora de raios.

### Agradecimentos

Os autores agradecem a STANET pela concessão dos dados de descargas atmosféricas, e ao Instituto Tecnológico Vale pelo apoio Técnico e Financeiro desta pesquisa.

### Referências

- Anagnostou, E. N., Chronis, T., 2004. The worth of long-range lightning observations on overland satellite rainfall estimation. Book Chapter, Kluwer Academic Publishers. (online) Doi: [https://doi.org/10.1007/9778-1-4020-5835-6\\_11](https://doi.org/10.1007/9778-1-4020-5835-6_11).
- Blakeslee, R. J., Christian, H. J., Stewart, M. F., Mach, D., Bateman, M., Walker, D., Buechler, D., Koshak, W., O'Brien, S., Wilson, T., Colley, C., Abbott, T., Carter, J., Pavelitz, S. Coker, C., 2014. Lightning imaging sensor (LIS) for the international space station (ISS): mission description and science goals. In: XV International Conference On Atmospheric Electricity, 15-20 June 2014, Norman, Oklahoma, U.S.A. [online]. Disponível: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20140011791.pdf>. Acesso: 15 ago 2019.
- Boccippio, D. J., Cummins, K. L., Christian, H. J., Goodman, S. J., 2001. Combined satellite- and surface-based estimation of the intracloud-to-ground lightning ratio over the continental United States, *Mon. Weather Rev.*, 129, 108 – 122.
- Bourscheidt, V., Breunig, F. M., Minussi, J. P., 2003. Descargas elétricas no sul do Brasil. In: Workshop Brasileiro De Micrometeorologia, Iii, 2003, Santa Maria. Anais. Santa Maria: Revista Ciência & Natura/ Universidade Federal De Santa Maria, P. 243-246.
- Buechler, D. E., Driscoll, K. T., Goodman, S. J., Christian, H. J., 2000. Lightning activity within a tornadic thunderstorm observed by the Optical Transient Detector (OTD). *Geophys. Res. Lett.*, 27, 2253–2256.
- Carvalho, L. M. V., Jones, C., Liebmann, B., 2004. The South Atlantic Convergence Zone: Persistence, Form, Extreme Precipitation and Relationships with Intraseasonal Activity.” *Journal of Climate*, v. 17, n.1, p. 88-108.
- Cecil, D. J., Buechler, D. E., Blakeslee, R. J., 2012. Gridded lightning climatology from trmm-lis and otd: dataset description.” *Atmos. Res.*, 135–136, 404–414, Doi:10.1016/J.Atmosres.2012.06.028.
- Chameides, W. L., Donald, S. H., Russell, D., David, W. R., Cicerone, R. J., 1977. NO<sub>x</sub> Production in Lightning. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 34. 10.1175/1520-0469(1977)034<0143: NPIL>2.0.CO;2.
- Christian, H. J., Blakeslee, R. J., Boccippio, D. J., William, L. B., 2003. Global Frequency And Distribution Of Lightning As Observed From Space By The Optical Transient Detector, *J. Geophys. Res.*, 108 (D1), 4005, 10.1029/2002jd002347.
- Christian, H. J., Blakeslee, R. J., Goodman S. J., 1992. Lightning imaging sensor (LIS) for the earth observing system. *Nasa Tech. Memo*. 4350, 36 p.
- Christian, H. J., Blakeslee, R. J., Goodman, S. J., Mach, D. M., 1999. The lightning imaging sensor. In: *Nasa Conference Publication*. Nasa, P. 746-749.
- Crepani, E., Medeiros, J. S., 2004. Imagens fotográficas derivadas de mnt do projeto srtn para fotointerpretação na geologia, geomorfologia e pedologia. INPE-11238-Rpq/761. Publicações. São José Dos Campos. 39 p.
- Crepani, E., Medeiros, J. S., 2005. Imagens cbers+imagens srtn+mosaicos geocover landsat em ambiente spring e terraview:

- sensoriamento remoto e geoprocessamento gratuitos aplicados ao desenvolvimento sustentável. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia. INPE, p. 2637-2644.
- Cummins, K. L., Murphy, M. J., 2009. An overview of lightning locating systems: history, techniques, and data uses, with an in-depth look at the U.S. NLDN. *IEEE Trans Electronmagn Compat* 51:499-519.
- De Souza, E. B., Kayano, M. T., Ambrizzi, T., 2005. Intraseasonal and submonthly variability over the eastern amazon and northeast Brazil during the autumn rainy season. *Theoretical and Applied Climatology*, 81: 177–191.
- Dentel, L. M., 2013. Modelagem de Sistemas de Detecção de Descargas Atmosféricas na Amazônia. Tese (Pós-Graduação Em Engenharia Elétrica), UFPA, Belém, Pará.
- Gottelman, A., Seidel, D. J., Wheeler, M. C., Ross, R. J., 2002. Multidecadal trends in tropical convective available potential energy, *J. Geophys. Res.*, 107(D21), 4606, doi:10.1029/2001JD001082.
- Gomes, M. A. S. S., 2003. Estudo dos relâmpagos na região sudeste do Brasil em função das características geográficas. Dissertação (Pós-Graduação Em Geofísica Espacial), Inpe, São José Dos Campos, São Paulo.
- Hugh, J. C., Richard, J. B., Dennis, J. B., 2003. Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the optical transient detector. *Journal Of Geophysical Research*, Vol. 108, No. D1, 4005, Doi:10.1029/2002jd002347.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2017. IBGE Cidades. Fonte: Brasil em Síntese. <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/panorama>. Acesso em 04 de fevereiro de 2018.
- Itterly, K. F., Taylor, P. C., Dodson, J. B., Tawfik, A. B., 2016. On the sensitivity of the diurnal cycle in the Amazon to convective intensity, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 121, 8186–8208, doi:10.1002/2016JD025039.
- Leal, A. F., 2014. Análise de sensores de descargas atmosféricas: protótipo de um detector de raios com estimativa de densidade de raios para região amazônica utilizando PSOC. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) UFPA, Belém, Pará.
- Lee, A. C. L., 1986. An experimental study of the remote location of lightning flashes using a VLF arrival time difference technique. *Quart. J. R. Met. Soc.*, V. 112, P. 203-229.
- MacGorman, D. R., Burgess, D. W., Mazur, V., Rust, W. D., Taylor, W. L., Johnson, B. C., 1989. Lightning rates relative to tornadic storm evolution on 22 May 1981. *J. Atmos. Sci.*, 46, 221–250.
- Mackerras, D., Darveniza, M., 1994. Latitudinal variation of lightning occurrence characteristics. *J. Geophys. Res.*, 99, 10,813-10,821.
- Mackerras, D., Darveniza, M., Orville, R. E., 1998. Global lightning: total, cloud and ground flash estimates. *J. Geophys. Res.*, 103, 19,791–19,809.
- Markson, R., 2007. The global circuit intensity, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 224, 233 – 241.
- Mesgana, S. G., Thian, Y. G., 2017. Trends in Convective Available Potential Energy (Cape) and Extreme Precipitation Indices over the United States and Southern Canada for summer of 1979-2013. *Civil Eng Res J.* 1(2): 555556. DOI: 10.19080/CERJ.2017.01.555556.
- Morales, C. A., Neves, J. R., Anselmo, E., 2011. Sferics Timing and Network – STARNET: evaluation over south america, proceeding of 14th international conference on atmospheric electricity – ICAE, Rio de Janeiro, Brazil.
- Morales, C., Anagnostou, E. N., 2003. Extending the capabilities of high-frequency rainfall estimation from geostationary-based satellite infrared via a network of long-range lightning observations. *Journal of Hydrometeorology*, 4(2), 141-159.
- Moura, A. C. M., Fonseca, B. M., Carvalho, G. A., 2006. Rotina para elaboração de MDE com o uso do ARCVIEW: utilizando a base de dados da shuttle radar topography mission realizada pela nasa. UFMG, Departamento de Cartografia, Laboratório De Geoprocessamento, Belo Horizonte.
- Pacheco, B. L. S., Silva Júnior, L. G., Oliveira, L. A., 2012. Estudo da relação entre temperatura/altitude e precipitação/altitude aplicando-se os métodos de correlação e

- regressão. *Revista Geonorte, Edição Especial 2, V.1, N.5, P. 561 – 572.*
- Pallotta, M., Nakazato, R. Y., 2010. Caracterização de episódios de zona de convergência do atlântico sul (ZCAS) e zona de convergência de umidade (ZCOU) em janeiro e fevereiro de 2010. In: XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Disponível: [http://dca.iag.usp.br/material/ritaynoue/aca-0523/2014\\_1oS\\_SIN2/pallotta\\_nakazato.pdf](http://dca.iag.usp.br/material/ritaynoue/aca-0523/2014_1oS_SIN2/pallotta_nakazato.pdf). Acesso: 23 nov 2018.
- Pickering, K. E., Wang, Y., Tao, W.-K., Price, C., Muller, J.-F., 1998. Vertical distribution of lightning NO<sub>x</sub> for use in regional and chemical transport models, *J. Geophys. Res.*, 103, 31 203– 31 216.
- Pierce, E. T., 1970. Latitudinal variation of lightning parameters. *J. Appl. Meteor.*, 9, 194-195.
- Pompeu, M. M., Souza, J. R. S., Ribeiro, W. M. N., Silva, C. C. S., Aarão Junior, R. N. N., 2017. Estudo das relações entre descargas elétricas atmosféricas e a chuva no Leste da Amazônia. *Revista Brasileira de Geografia Física v.10, n.01, 267-279.*
- Prentice, S. A., Mackerras, D., 1977. The ratio of cloud to cloud-ground lightning flashes in thunderstorms. *J. Appl. Meteor.*, 16, 545–550.
- Quadro, M. F. L., Silva Dias, M. A. F., Herdies, D. L., Gonçalves, L. G. G., 2012. Análise Climatológica da Precipitação e do Transporte de Umidade na Região da ZCAS Através da Nova Geração de Reanálises. *Revista Brasileira de Meteorologia, V.27, P.152 -162.*
- Rakov, V. A., Uman, M. A., 2003. *Lightning: Physics and Effects*. UK: Cambridge University Press. p. 687. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107340886>. Acesso em: 23 jun 2018.
- Reap, R. M., 1986. Evaluation Of Cloud-To-Ground Lightning Data From The Western United States For The 1983-1984, Summer Seasons. *J. Climate Appl. Meteorol.*, 25: 785-799.
- Ribeiro, W. M. N., Souza, J. R., Lopes, M. N. G., , 2014. Lightning and Precipitation Produced by Severe Weather Systems over Belém, Brazil. *Revista Brasileira de Meteorologia, v. 29, n. esp., 41 - 59.*
- Rycroft, M. J., Israelsson, S., Price, C., 2000. The global atmospheric electric circuit. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 62, 1563–1576.
- Silva Ferreira, D. B. S., De Souza, E. B., Moraes, B. C., Meira Filho, L. G., 2015. Spatial and temporal variability of rainfall in eastern Amazon during the rainy season. *The Scientific World Journal, v. 2015, Article ID 209783, p. 1-9.*
- Sodre, G. R. C., Moraes, B. C., Ferreira, D. B. S., Oliveira, J. V., De Souza, E. B., 2015. Teleconexões oceânicas nos padrões climatológicos da amazônia oriental: análise dos últimos 40 anos (1974-2013). *Revista Brasileira de Climatologia, Ano 11, v. 17, p.52-66.* Doi: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v17i0.38113>
- Williams, E., 2007. The global electrical circuit: A review. *Atmospheric Research*. 91. 140-152. 10.1016/j.atmosres.2008.05.018.
- Williams, E., Bob, B., Anne, M., Mark, W., Stephen, H., Don, S., Ravi, R., Dennis, B., 1999. The behavior of total lightning activity in severe Florida thunderstorms. *Atmospheric Research*. 51. 245-265. 10.1016/S0169-8095(99)00011-3.
- Zepka, G. S., 2005. Estudo para o desenvolvimento de um previsor descargas elétricas atmosféricas aplicadas à região costeira do estado do rio de janeiro. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande, Programa de Pós-Graduação Em Engenharia Oceânica, Escola de Engenharia.