

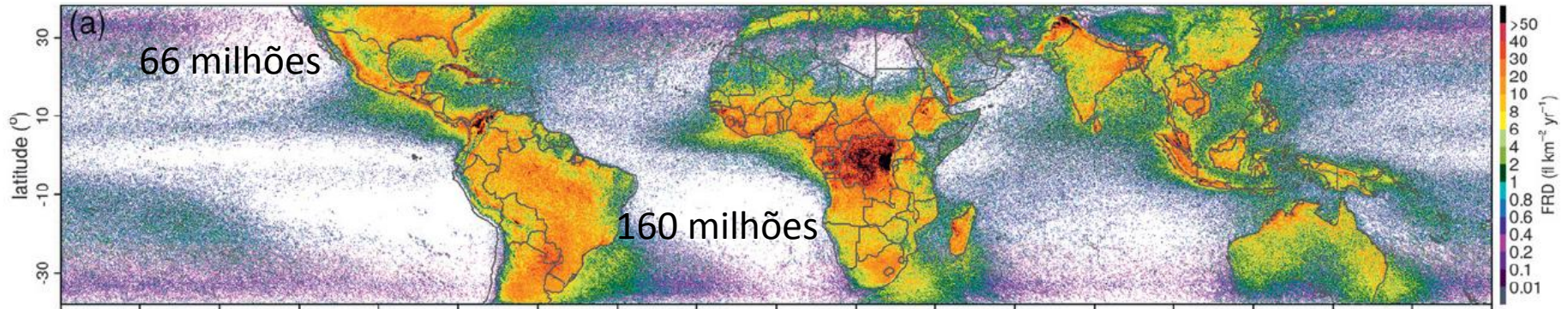
Tempestades Eléctricas: Das nuvens até o campeão mundial de raios

Carlos Augusto Morales

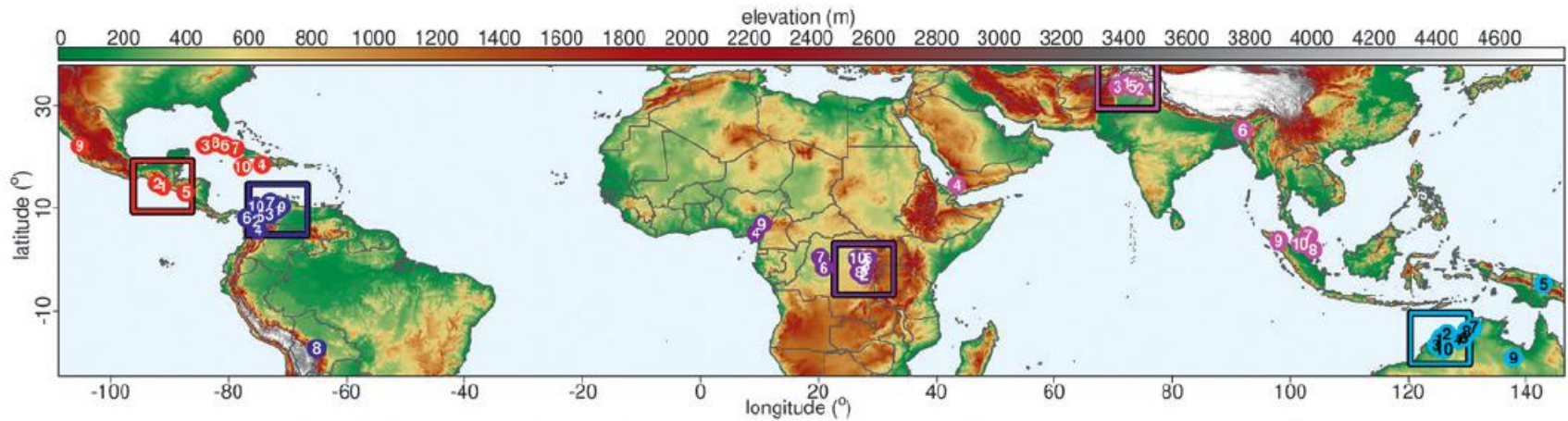
carlos.morales@iag.usp.br

<http://www.starnet.iag.usp.br>

Densidade de Relâmpagos Total no Globo



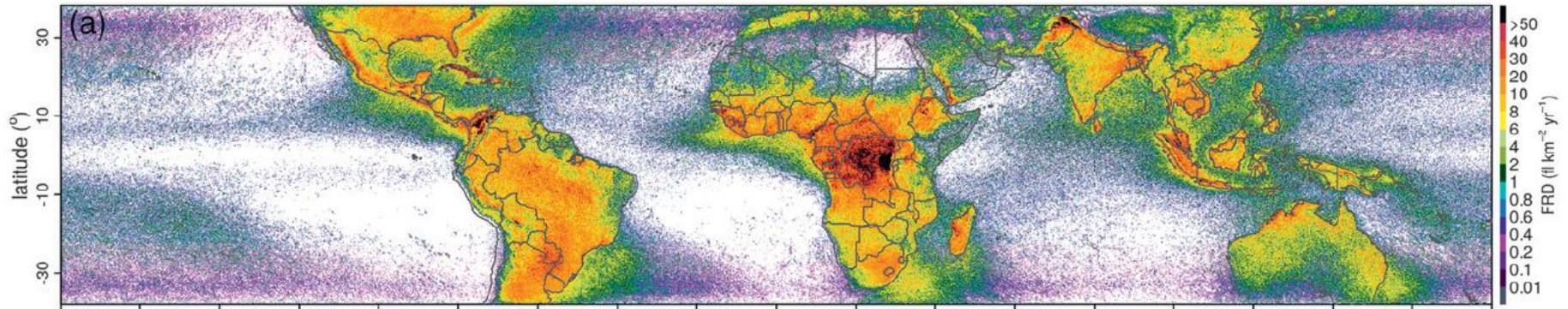
50 raios IN/segundo e 10 raios NT/segundo



WHERE ARE THE LIGHTNING HOTSPOTS ON EARTH?

BY RACHEL I. ALBRECHT, STEVEN J. GOODMAN, DENNIS E. BUECHLER,
RICHARD J. BLAKESLEE, AND HUGH J. CHRISTIAN

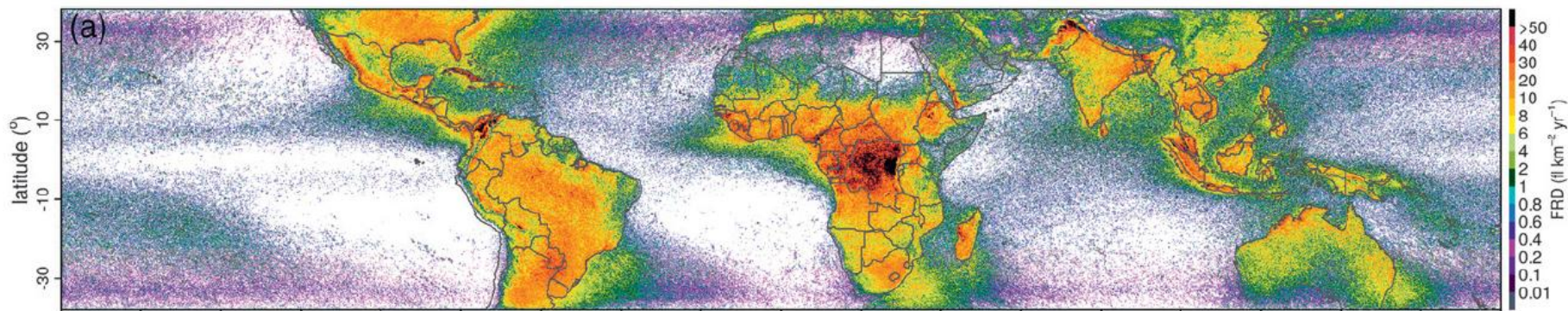
Densidade de Relâmpagos Total no Globo



Mais de 1,8 bilhões de raios anuais

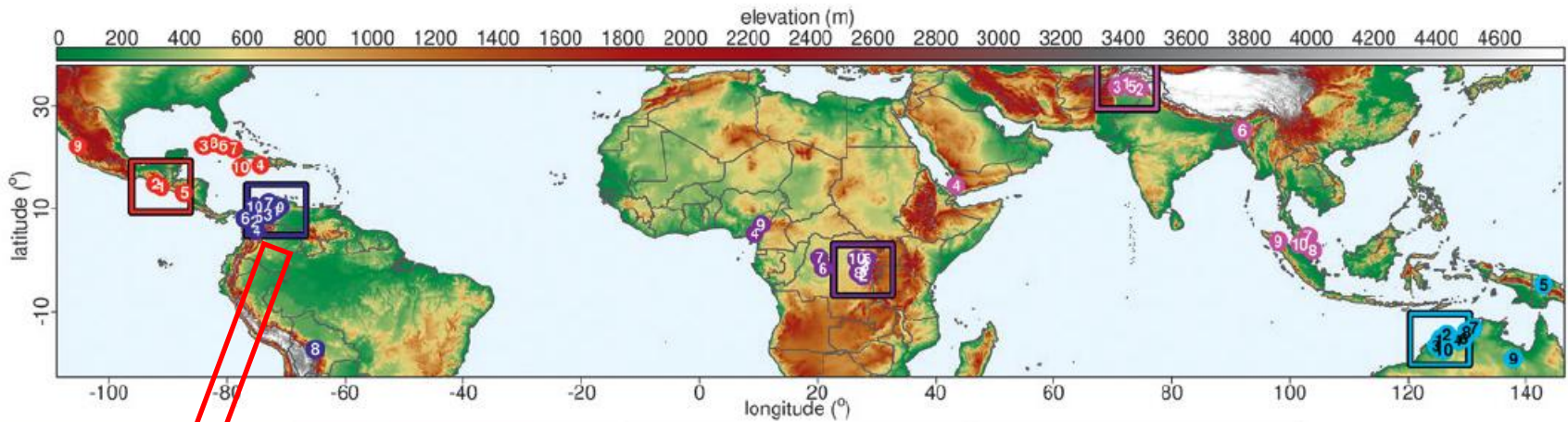
Continentes	Número de Relâmpagos por Ano
America do Sul	183.061.397
America do Norte	57.802.494
África	357.320.205
Oceania	43.479.861
Asia	157.758.517

Densidade de Relâmpagos Total no Globo



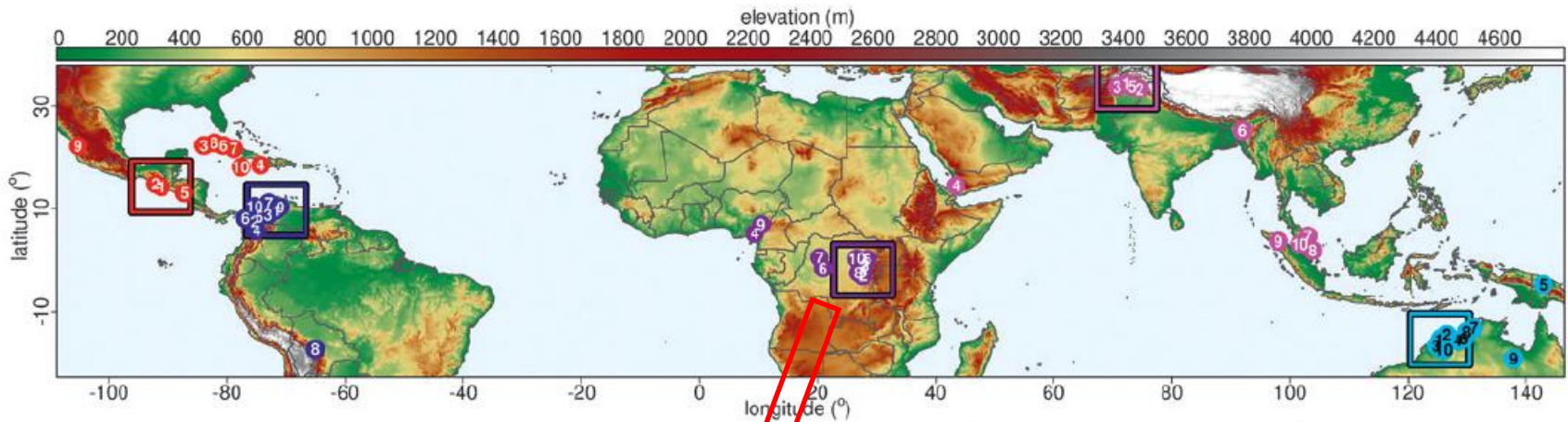
Ranking	Pais	Continente	Número de Flashes/Ano	Área (km ²)
1	Brasil	América do Sul	108.484.129	8.520.481
2	Congo	África	95.161.218	2.346.337
3	Australia	Oceania	43.279.723	7.610.546
4	India	Ásia	35.440.450	3.159.246
5	Argentina	América do Sul	26.689.789	1.933.305
6	China	Ásia	26.321.509	5.631.555
7	Indonesia	Ásia	24.588.469	1.896.402
8	Mexico	América Central	23.252.554	1.956.060
9	Colombia	América do Sul	20.697.308	1.145.611
10	Angola	Africa	19.156.615	1.253.139

Hotspots de Raios no Globo



Rank Mundial	Rank	Flashes/ km ² ano	Latitude (°)	Longitude (°)	Cidade (>1000)	Pais
1	1	232,52	9,75	-71,65	Lagunillas	Venezuela
4	2	172,29	7,55	-75,35	Cáceres	Colombia
7	3	138,61	8,85	-73,05	El Tarra	Colombia
11	4	124,26	5,75	-74,95	Norcasia	Colombia
18	5	114,19	8,45	-74,55	Majagual	Colombia
25	6	105,73	8,15	-76,85	Turbo	Colombia
46	7	95,38	11,15	-72,95	Barrancas	Colombia
74	8	87,96	-17,25	-65,05	Chimoré	Bolivia
78	9	87,61	10,35	-70,95	El Corozo	Venezuela
136	10	77,02	10,45	-75,35	Santa Rosa	Colombia

Hotspots de Raios no Globo



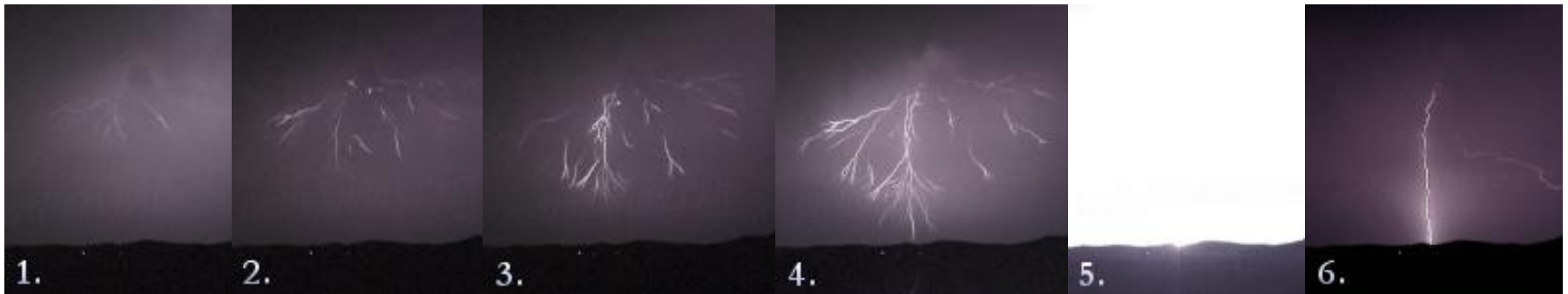
Rank Mundial	Rank	Flashes/ km ² ano	Latitude (°)	Longitude (°)	Cidade (>1000)	Pais
2	1	205,31	-1,85	27,75	Kabare	Congo
3	2	176,71	-3,05	27,65	Kampene	Congo
5	3	143,21	-0,95	27,95	Sake	Congo
8	4	129,58	5,25	9,35	Nguti	Cameroon
9	5	129,50	0,25	28,45	Butembo	Congo
10	6	127,52	-1,55	20,95	Boende	Congo
14	7	117,98	0,55	20,35	Boende	Congo
15	8	117,19	-2,45	26,95	Kindu	Congo
16	9	116,78	6,95	10,45	Baissa	Nigeria
19	10	112,17	0,35	26,65	Kisangani	Congo

TABLE ES3. Top 500 FRD ($\text{fl km}^{-2} \text{yr}^{-1}$) grid points, indicating their latitude and longitude position, name of the nearest populated place location (PPL) according to the GeoNames database, the corresponding continent landmass, and distance between the center of this grid and the PPL coordinates. A minimum distance of 100 km from a previous ranked grid point was applied.

Rank	FRD ($\text{fl km}^{-2} \text{yr}^{-1}$)	Grid lat ($^{\circ}$)	Grid lon ($^{\circ}$)	Nearest PPL from GeoNames	Country	Continent	PPL lat ($^{\circ}$)	PPL lon ($^{\circ}$)	Distance (km)
1	232.52	9.75	-71.65	Lagunillas (actually over Lake Maracaibo)	Venezuela	South America	10.13	-71.26	60.1
2	205.31	-1.85	27.75	Kabare	Democratic Republic of the Congo	Africa	-2.50	28.79	136.2
3	176.71	-3.05	27.65	Kampene	Democratic Republic of the Congo	Africa	-3.60	26.67	124.9
4	172.29	7.55	-75.35	Cáceres	Colombia	South America	7.58	-75.35	3.4
5	143.21	-0.95	27.95	Sake	Democratic Republic of the Congo	Africa	-1.57	29.04	140.0
6	143.11	34.45	72.35	Daggar	Pakistan	Asia	34.51	72.48	14.0
7	138.61	8.85	-73.05	El Tarra	Colombia	South America	8.58	-73.09	30.9
8	129.58	5.25	9.35	Nguti	Cameroon	Africa	5.33	9.42	11.7
9	129.50	0.25	28.45	Butembo	Democratic Republic of the Congo	Africa	0.14	29.29	94.3
10	127.52	-1.55	20.95	Boende	Democratic Republic of the Congo	Africa	-0.28	20.88	141.2
11	124.26	5.75	-74.95	Norcasia	Colombia	South America	5.58	-74.89	20.4
12	121.41	33.35	74.55	Rajauri	India	Asia	33.38	74.31	22.6
13	118.81	33.75	70.75	Doaba	Pakistan	Asia	33.42	70.74	36.2
14	117.98	0.55	20.35	Boende	Democratic Republic of the Congo	Africa	-0.28	20.88	109.7
15	117.19	-2.45	26.95	Kindu	Democratic Republic of the Congo	Africa	-2.94	25.92	126.7
16	116.78	6.95	10.45	Baissa	Nigeria	Africa	7.23	10.63	36.6
17	116.76	14.35	-91.15	Patulul	Guatemala	North America	14.42	-91.17	7.6
18	114.19	8.45	-74.55	Majagual	Colombia	South America	8.54	-74.62	12.6
19	112.17	0.35	26.65	Kisangani	Democratic Republic of the Congo	Africa	0.52	25.19	163.3
20	111.11	4.45	8.45	Ikang	Nigeria	Africa	4.79	8.53	38.8
21	108.47	-3.55	22.55	Lodja	Democratic Republic of the Congo	Africa	-3.52	23.60	116.6

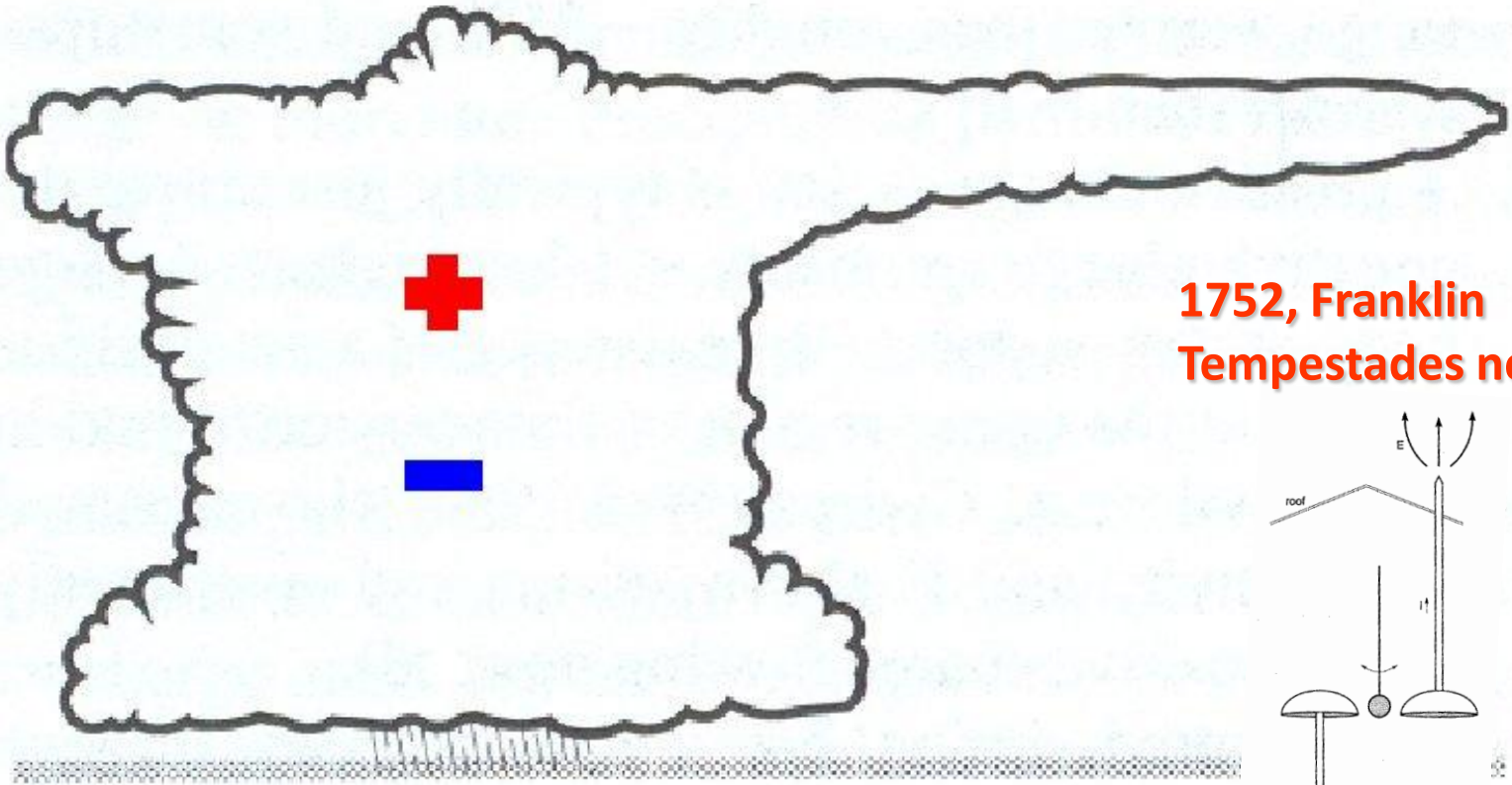
O que é um raio?

- O raio é uma descarga elétrica (**corrente elétrica**) que se propaga entre dois centros de cargas elétricas de polaridade oposta.
- Para que o raio ocorra é necessário quebrar a resistência do dielétrico ($\sim 3 \text{ G}\Omega/\text{m}$), ou seja, precisamos de um campo elétrico da ordem de $300 \text{ kV}/\text{m}$.

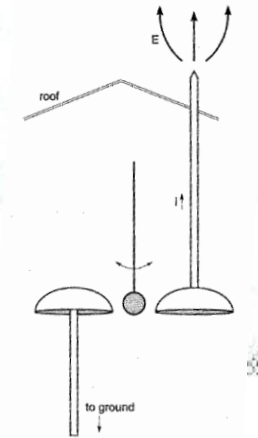


1800: cargas negativas dominam

1916-30: especulações sobre dipólo elétrico (Simpson e Wilson)



1752, Franklin
Tempestades negativas



Wilson: “a chuva carrega as cargas negativas e deixa as cargas positivas na nuvem”.

Medidas dentro da nuvem indicam dipolo positivo. (**positivo acima de centro negativo**)

Simpson: “Medidas na Índia, a chuva esta predominantemente carregada positivamente, A quebra das gotas de chuva cria o dipolo negativo (**negativo sobre o positivo**)

As primeiras observações com balões da década de 1940 indicam a presença de tripólos!!!

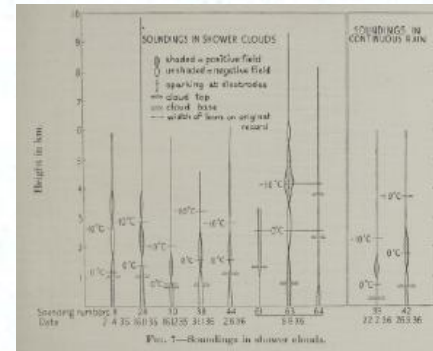
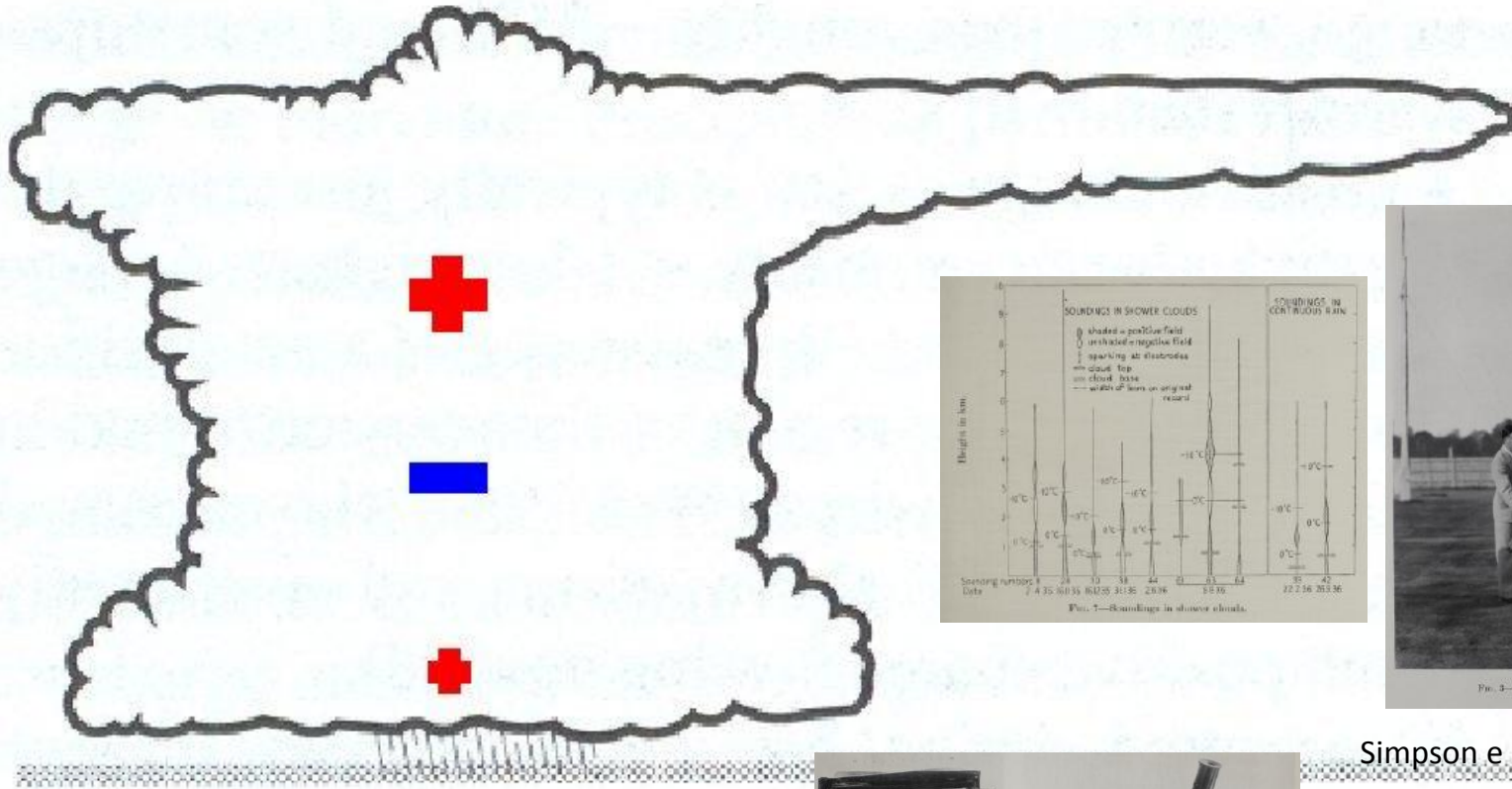


Fig. 3—Apparatus ready for launching.

Simpson e Scrase, 1937

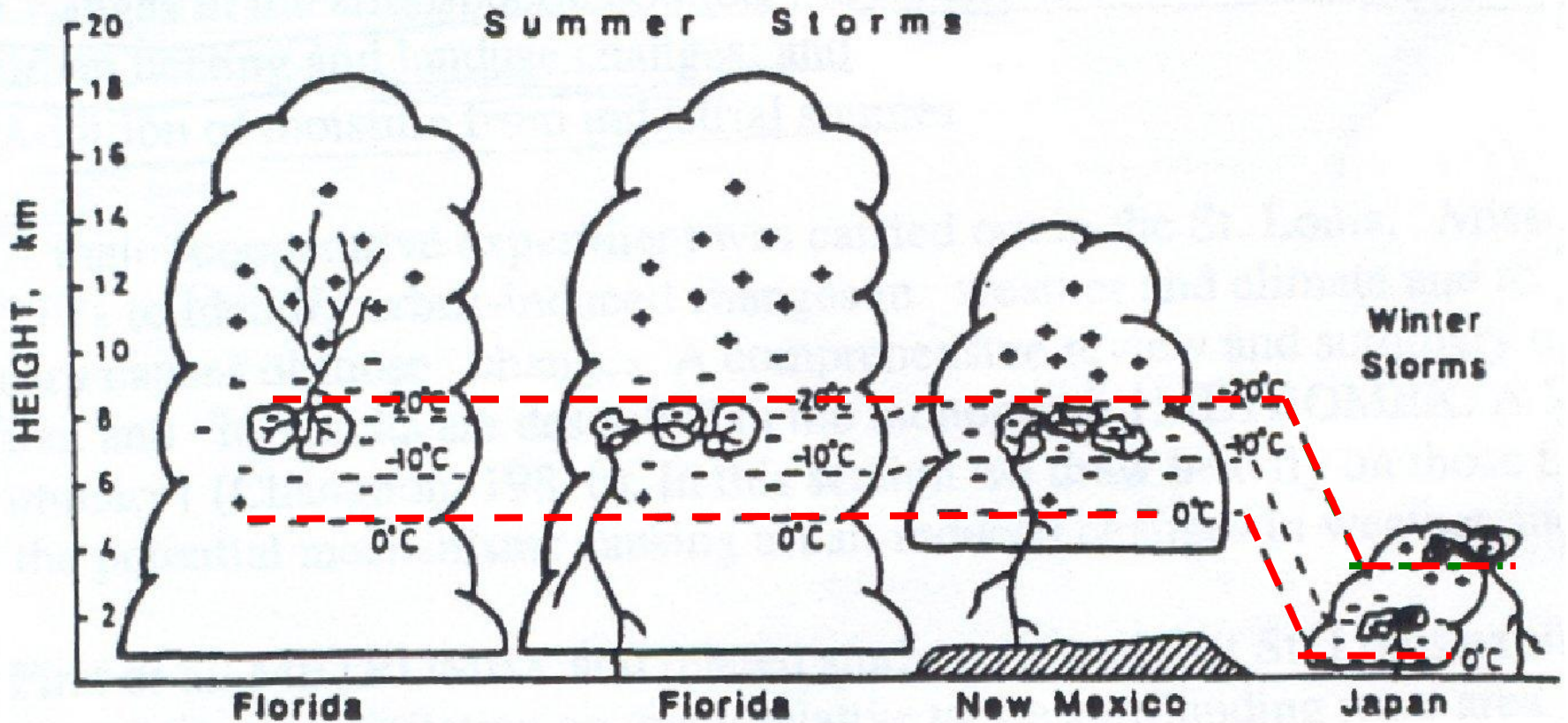


Fig. 1—The altielectrograph.

Fig. 4—Apparatus for measurement of peaks.

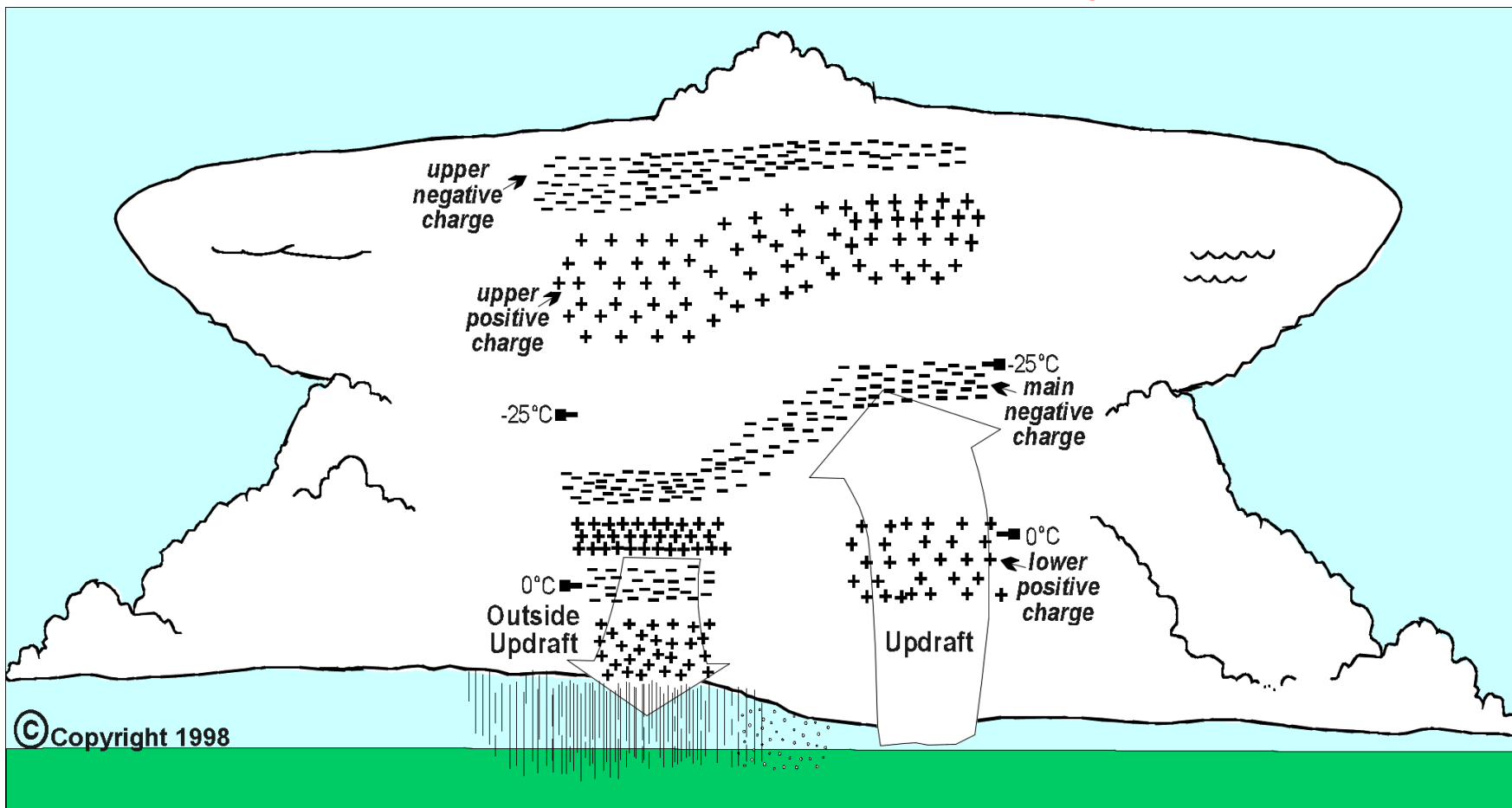
Altielectrograph

Mais tarde, na década de 1980, observou-se centros negativos na mesma região de temperatura



Krehbiel, Paul R., "The Electrical Structure of Thunderstorms," Ch. 8 in The Earth's Electrical Environment, National Academy Press, Washington, 1986

Estrutura Elétrica das Tempestades

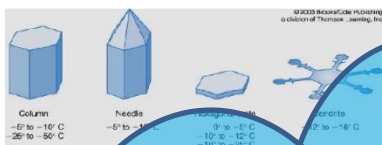


Stolzenburg et al. (1998)

Como os centros de cargas se formam nas Tempestades?

Se as gotas de chuva e cristais de gelo tem a mesma quantidade de cargas elétricas positivas (íons positivos) e negativas (íons negativos), *Como podemos explicar a formação de centros de cargas dentro das tempestades elétricas?*

F



Deposição – Cristais de gelo

T = - 40°C

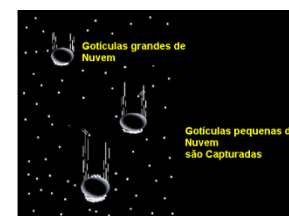
Deposição – Cristais de gelo



Agregação e Acreção – Gotículas de água super-resfriada, cristais de gelo e granizo

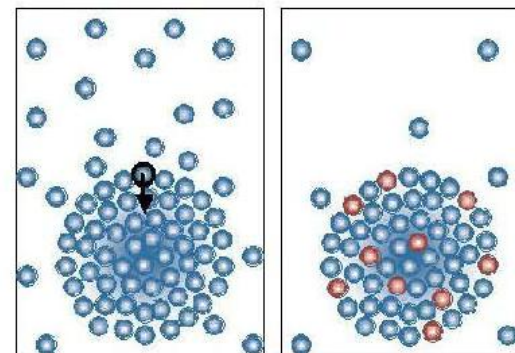
Congelamento: Gotículas de água super-resfriada

T = 0°C



Colisão/Coalescência – Gotas de nuvem e chuva

Condensação – Gotículas de nuvem

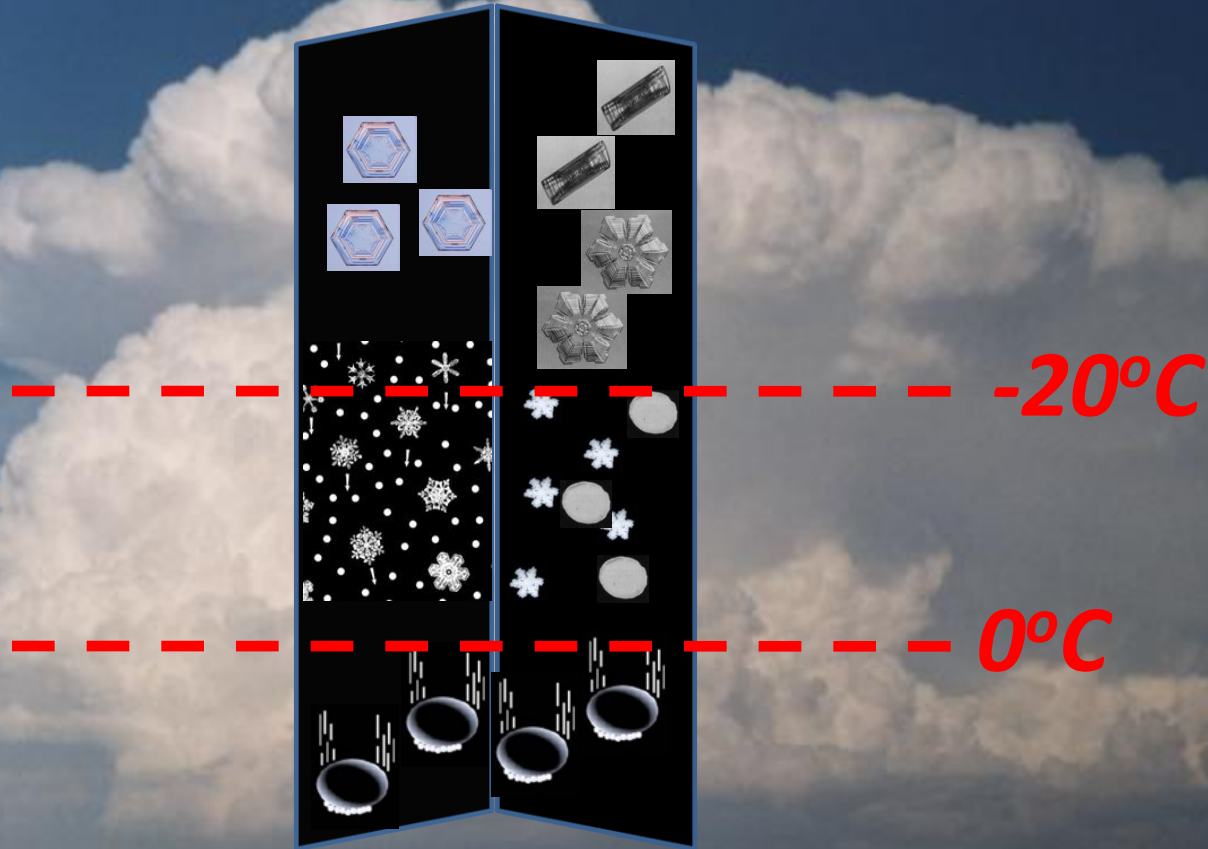


Evaporação – Vapor d'água

Temperatura

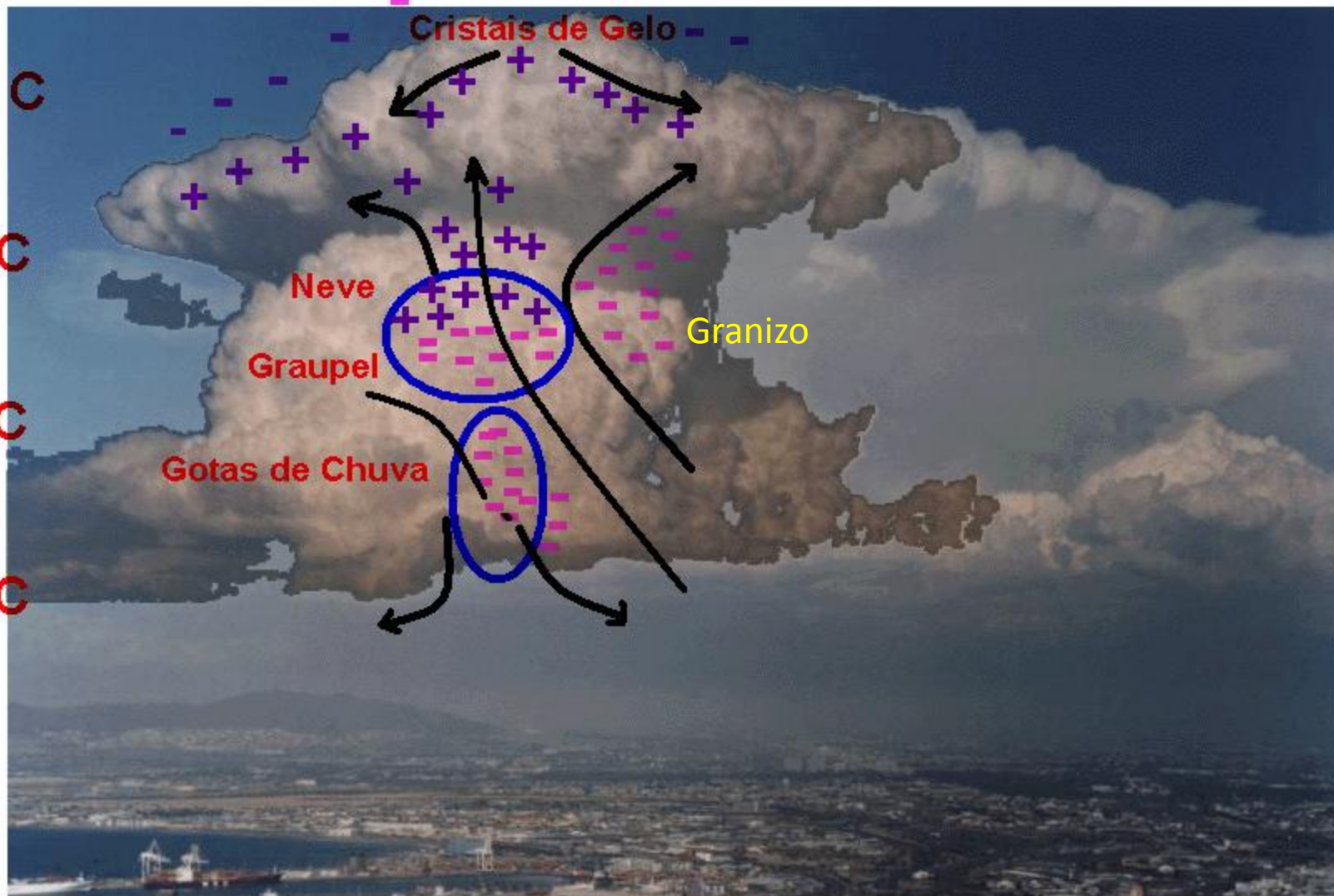
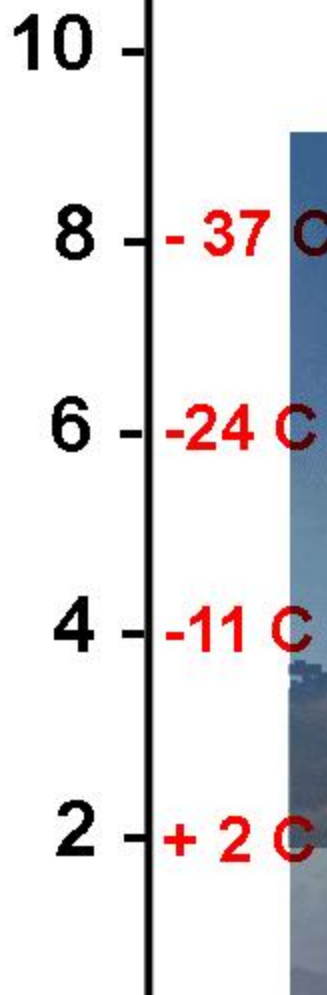
Q

O que temos dentro de um Cb



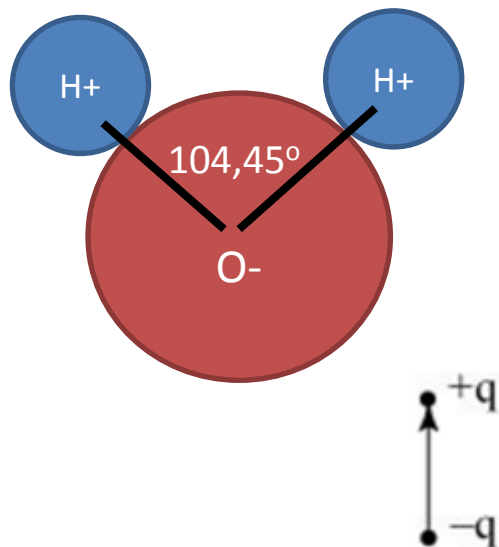
Altura (km)

*RAIO X DE UMA NUVEM
DE TEMPESTADE ELÉTRICA*

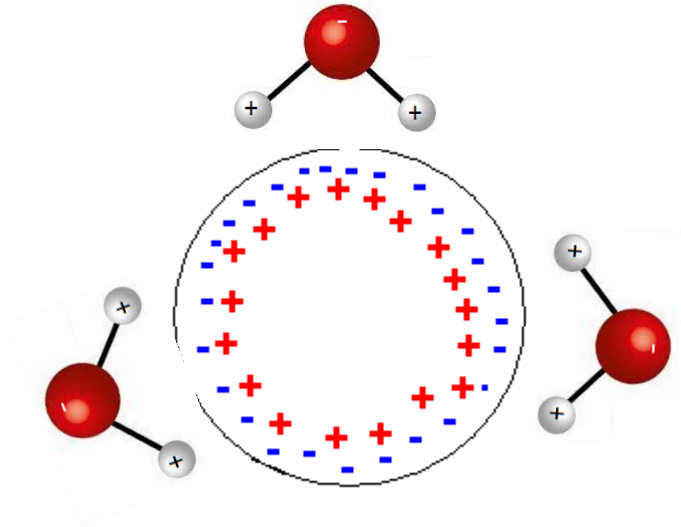


Propriedades elétricas da água

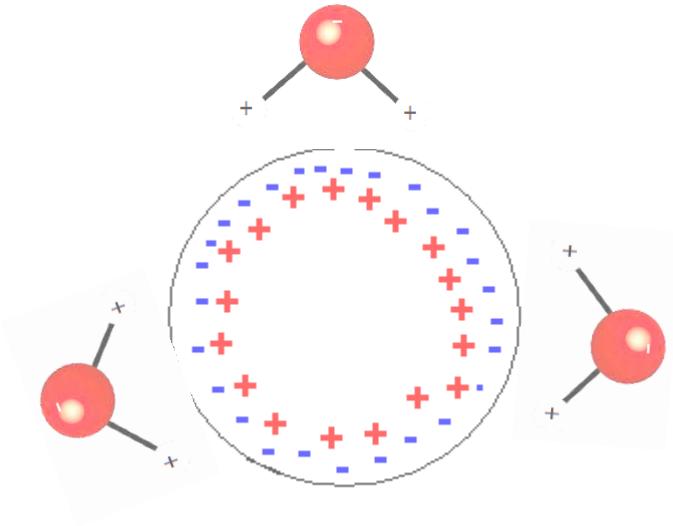
- A água é uma molécula polar e tem um momento de dipolo permanente ($p = 6.18 \times 10^{-30}$ cm),
- A distribuição de elétrons na molécula implica em:
Q+ nos núcleos de H e **Q-** no de O₂.
- O vértice do O₂ sempre fica para fora



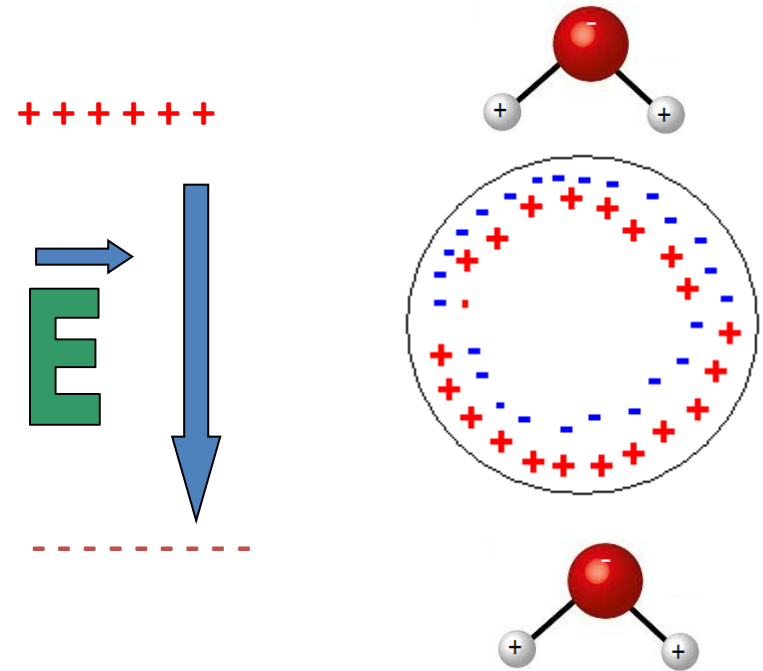
- Dessa forma, as gotas de chuva parecem estar carregadas negativamente



- Dessa forma, as gotas de chuva parecem estar carregadas negativamente



- Sob a ação de um Campo Elétrico, as moléculas se alinham e formam um dielétrico.



Teorias de eletrificação se dividem em duas grandes categorias:

i) Precipitação.

ii) Convecção;

TEORIA DA PRECIPITAÇÃO

É baseada nos processos de formação da precipitação:
colisões entre as partículas!! (Julius Elster e Hans F. Geitel em 1885)

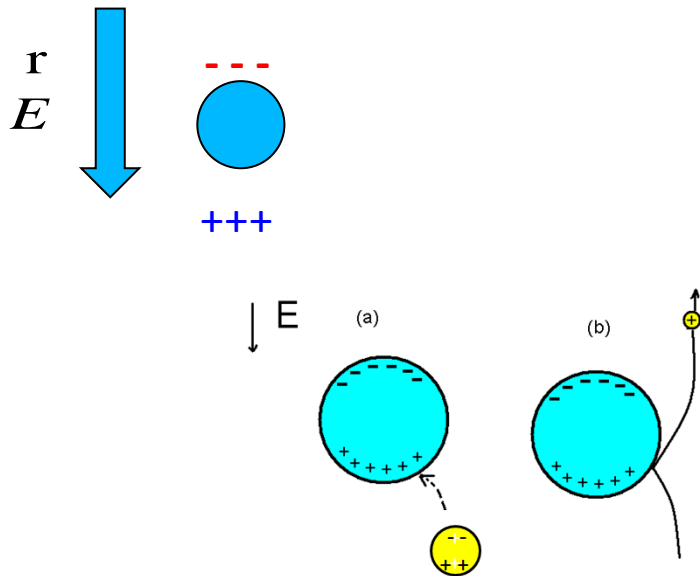
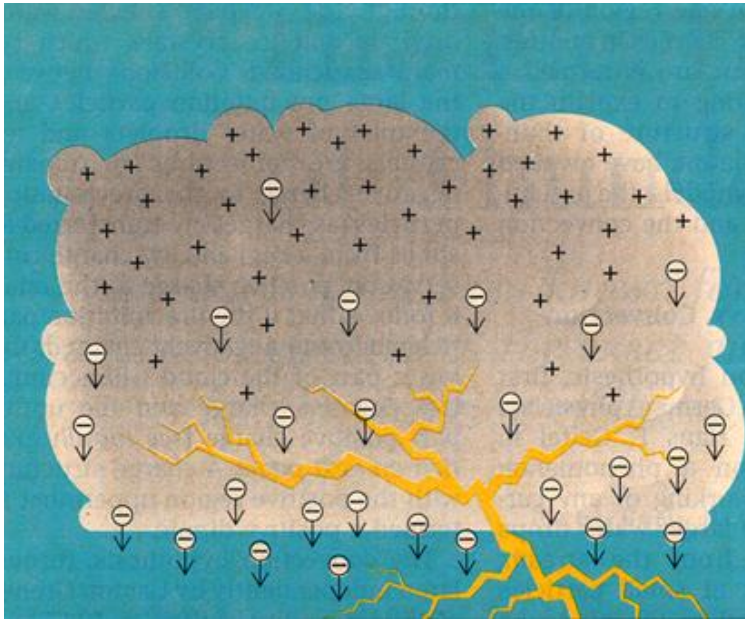
Requerimentos:

- ✎ Presença de um Campo Elétrico para polarizar a água
- ✎ As partículas se rebatem após as colisões;
- ✎ Cargas devem ser separadas de acordo com seus tamanhos ou temperatura (para formar tripólo);
- ✎ Transferência de cargas é rápida e ocorre durante a colisão;

Dipolo

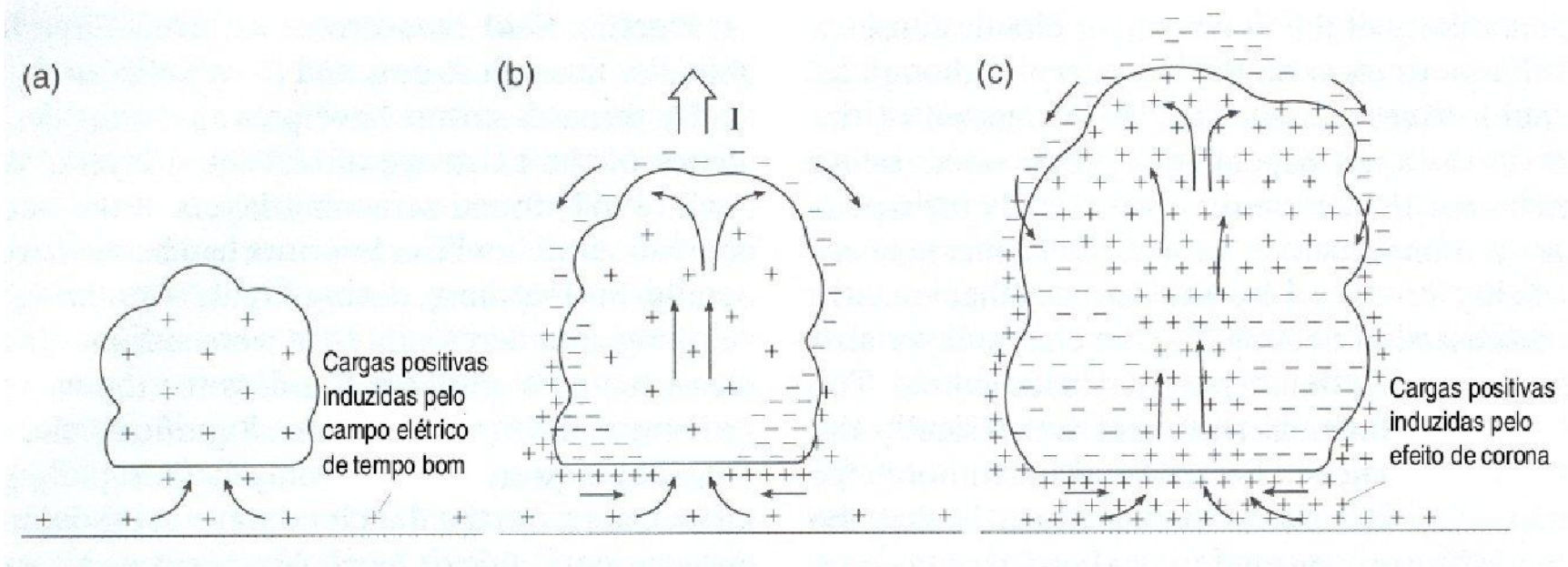
Modelo de precipitação

sugere que a gravidade induz o movimento descendente das gotas de chuva que são mais pesadas (granizo, e partículas de gelo como graupel), logo elas colidem com as partículas menores de água e de gelo que estão suspensas. *Durante este processo de colisão seguido de rebatimento, elas transferem cargas positivas para as partículas menores e assim as mais pesadas ficam negativas.*

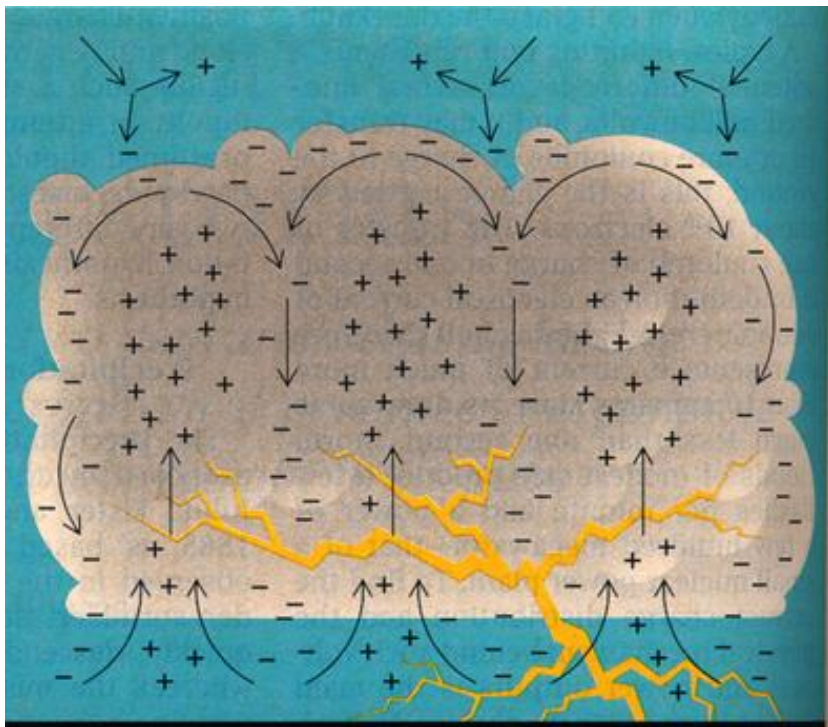


TEORIA DA CONVECÇÃO

Grenet (1947), Vonnegut (1955, 1963), e Telford (1981)



- ❑ Não requer a presença de campo elétrico para polarizar as partículas.
- ❑ As cargas têm origem externa (terra e ionosfera)



O Modelo de Convecção

Esta hipótese propõe que as correntes ascendentes de ar quente próximo superfície carreguem as cargas positivas (liberadas pela superfície da terra) e as transportem até o topo da nuvem.

Estas cargas positivas por sua vez atraem as cargas negativas produzidas pelos raios cósmicos da ionosfera e formam uma camada de blindagem.

Posteriormente as correntes descendentes transportam as cargas negativas para a parte inferior e lateral da nuvem.

Mas no que estas hipóteses
falham?

Mas no que estas hipóteses falham?

- O Campo elétrico da atmosfera não é suficiente para polarizar os hidrometeoros; (100 a 300 V/m)
- Não conseguem explicar a camada de cargas negativa entre as isoterms de 0°C e -20°C.

Mecanismos de Eletrificação em Nuvens

- *Mecanismo Indutivo*

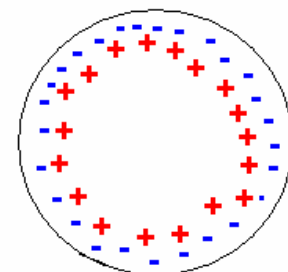
- *Mecanismo de Captura de Íons:*
- *Mecanismo Indutivo de partícula-partícula*

- *Mecanismo Não Indutivo*

- *Camada elétrica dupla*
- *Efeito termo elétrico*
- *Camada quase líquida*
- *Deslocamento de estruturas de gelo*
- *Potencial de contato*



1 C/km³min




Mecanismos de Eletrificação em Nuvens

- *Mecanismo Indutivo*

- *Mecanismo de Captura de Íons:*
- *Mecanismo Indutivo de partícula-partícula*

- *Mecanismo Não Indutivo*

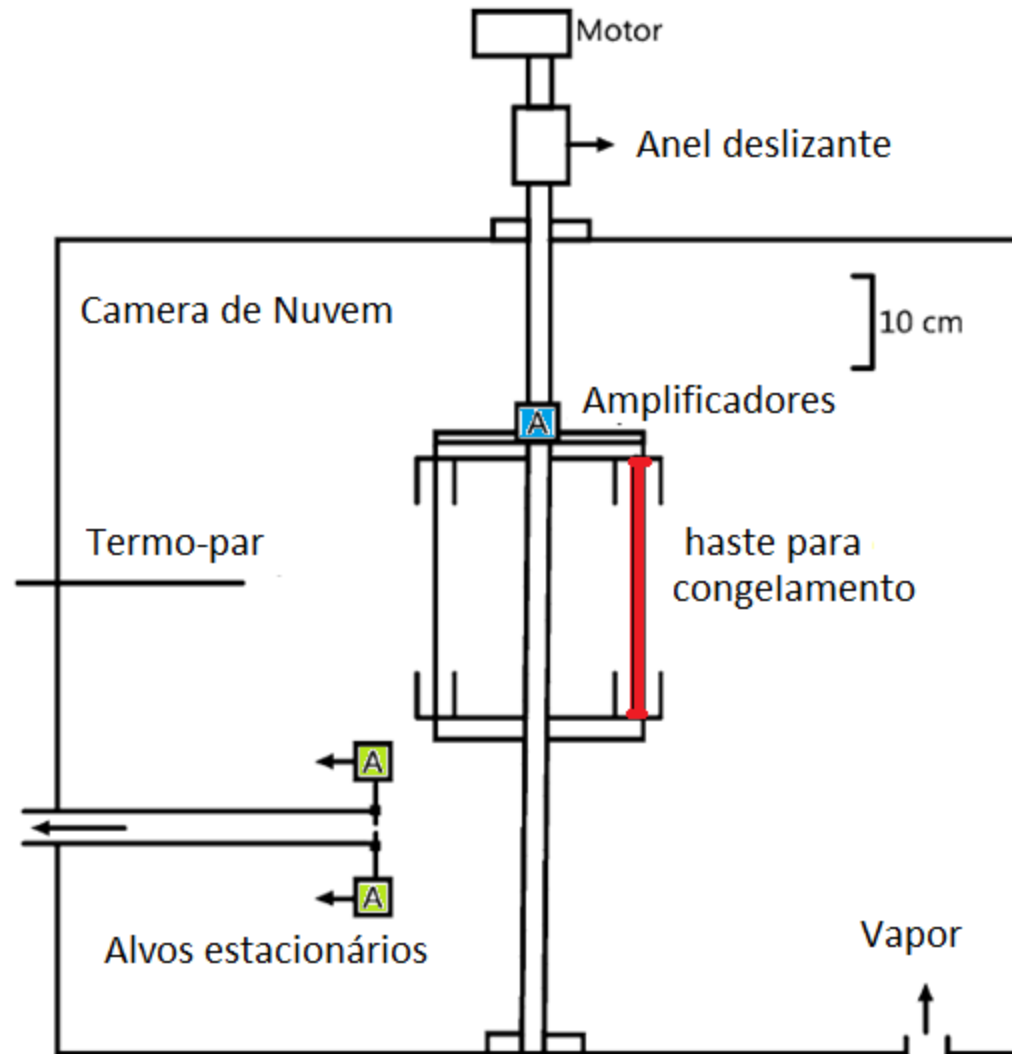
- *Camada elétrica dupla*
- *Efeito termo elétrico*
- *Camada quase líquida*
- *Deslocamento de estruturas de gelo*
- *Potencial de contato*



**Colisões entre
gotículas de água
super-resfriada
com
granizo/graupel**

Câmara de Nuvem

Fig. 7 Cold room cloud chamber and charge transfer apparatus. (Jayaratne 1981)



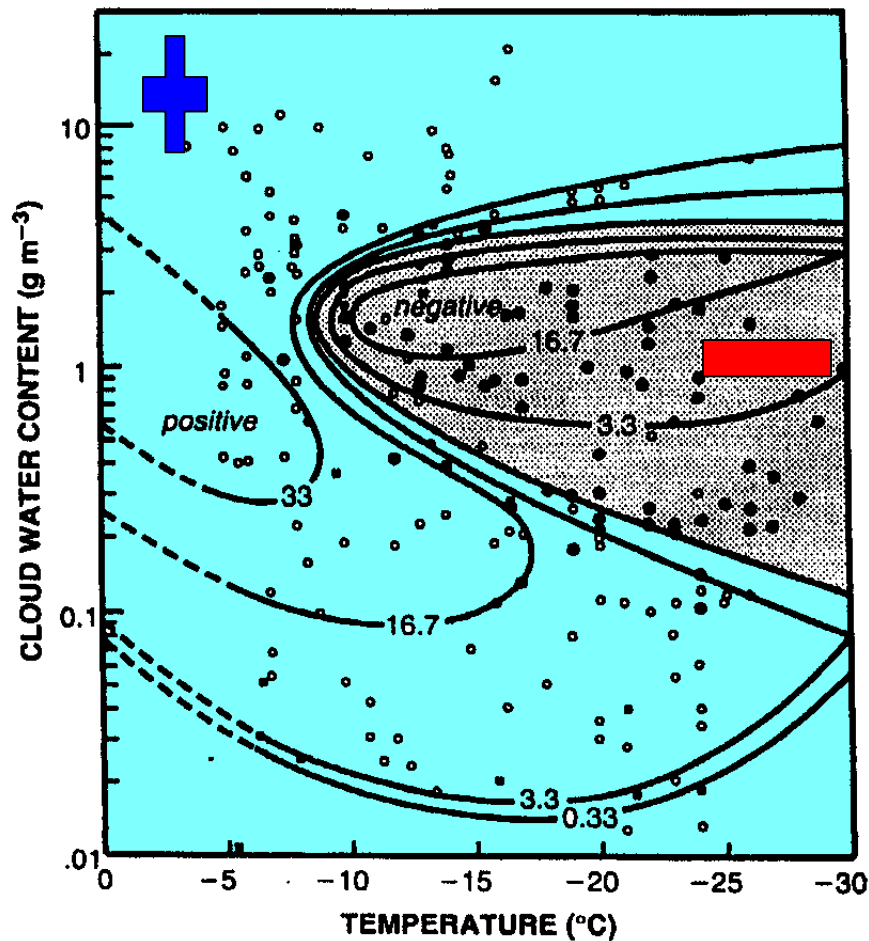


Fig. 3.12. Charge (in fC) gained by rimed graupel colliding with ice particles as a function of temperature and liquid water content. Open circles indicate that rimed graupel gained positive charge, solid circles indicate that it gained negative charge, and x's indicate that no charge was transferred. (Adapted from Takahashi 1978, with permission.)

Takahashi (1978) encontrou que a magnitude e o sinal da carga depositada no **graupel** dependia da **temperatura** e do **LWC**, e o tamanho da gota líquida não tinha nenhum efeito quando o LWC era mantido constante.

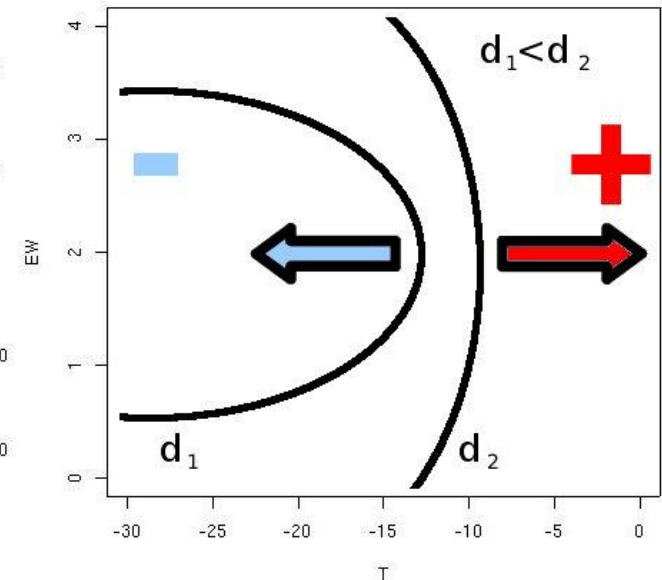
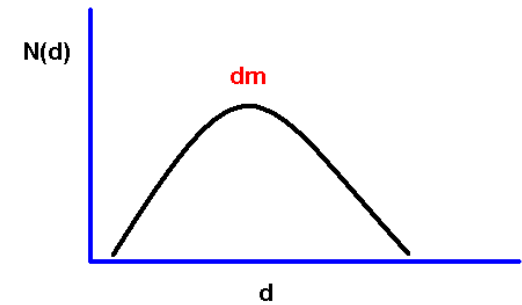
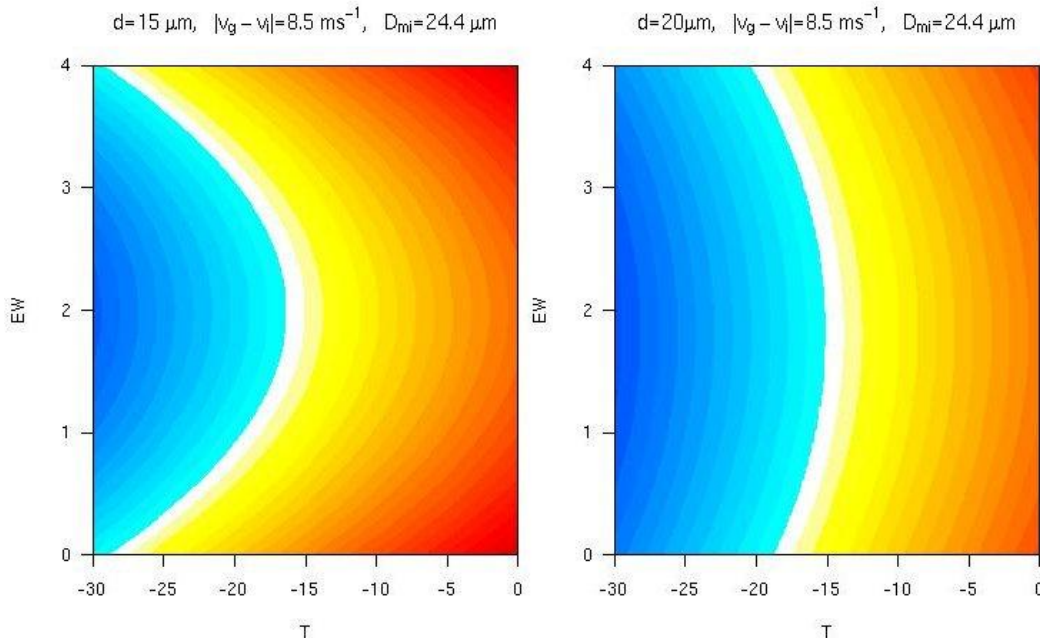
Obs: Colisão de cristais de gelo sobre o graupel que foi formado pelo congelamento da gota de água super-resfriada.

Avila e Pereyra (2000):

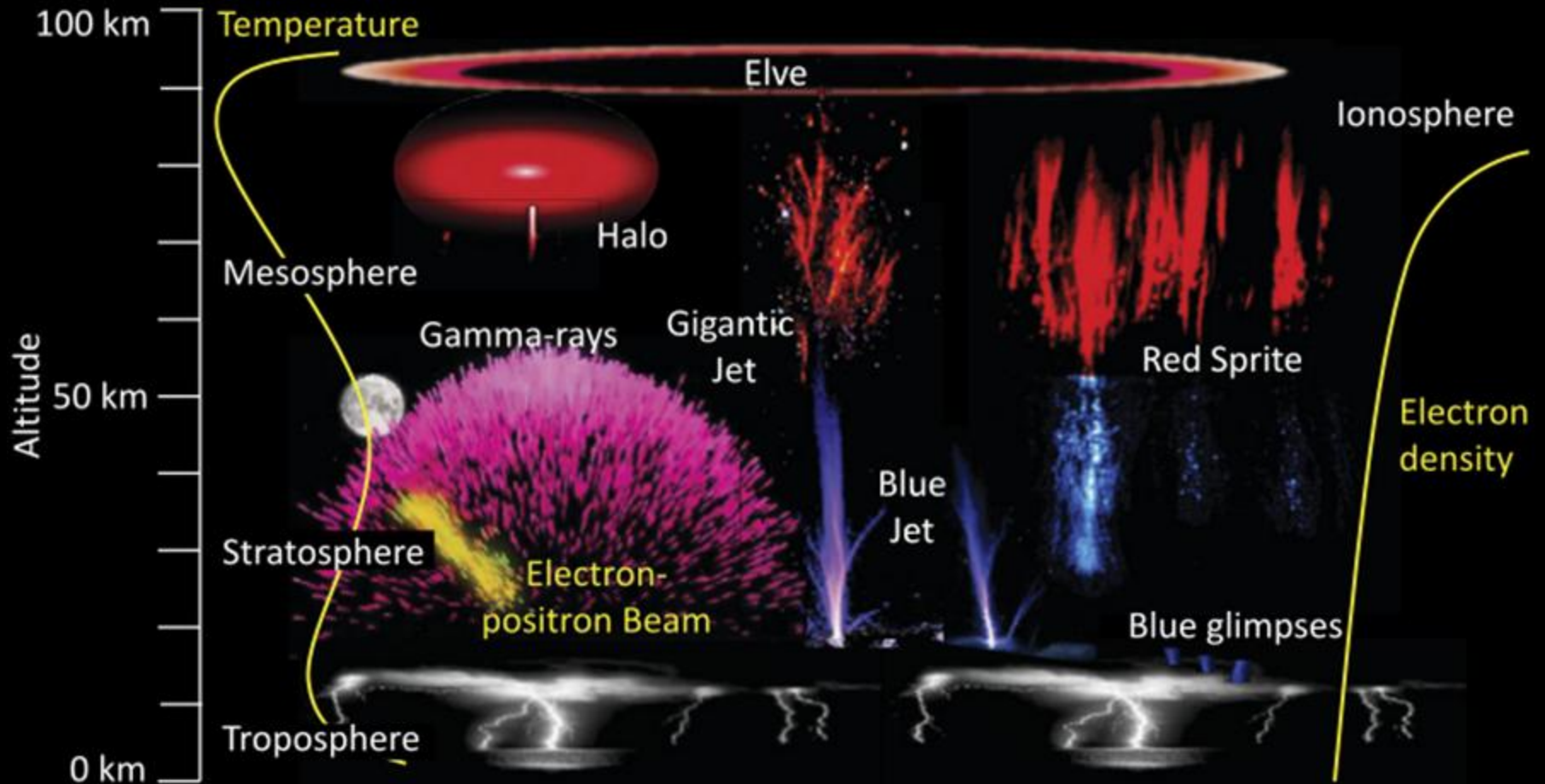
Mais tarde, Avila e Pereyra replicaram o experimento de Takahashi mas controlavam o tamanho das gotículas (d) e *dos* cristais de gelo na câmara de nuvem e identificaram uma dependência com d

$d = 15 \mu\text{m}$

$d = 20 \mu\text{m}$

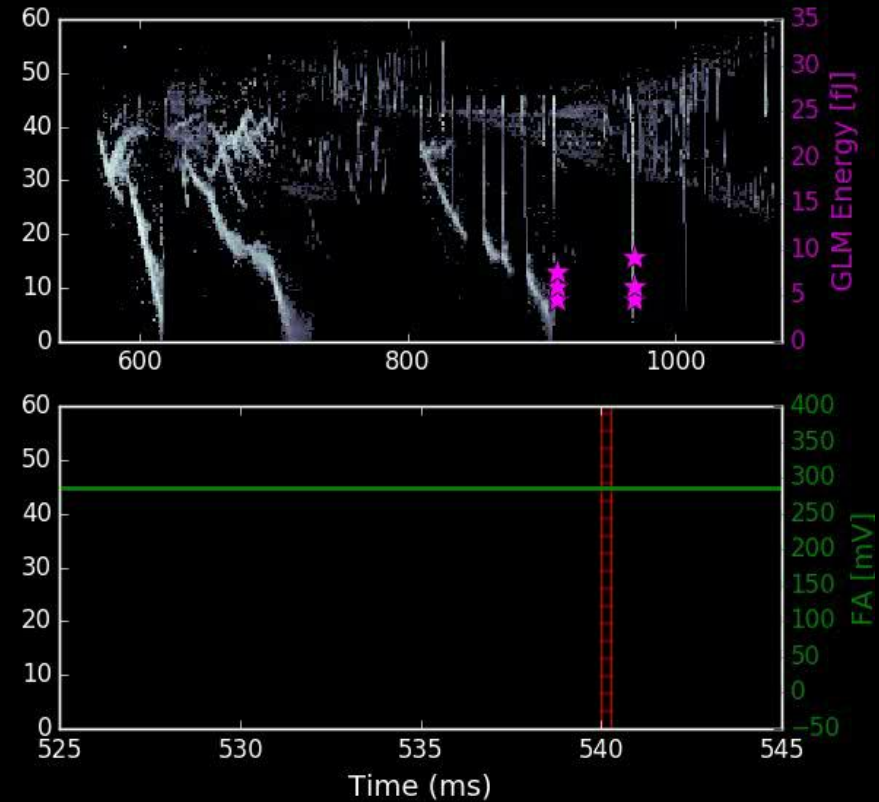
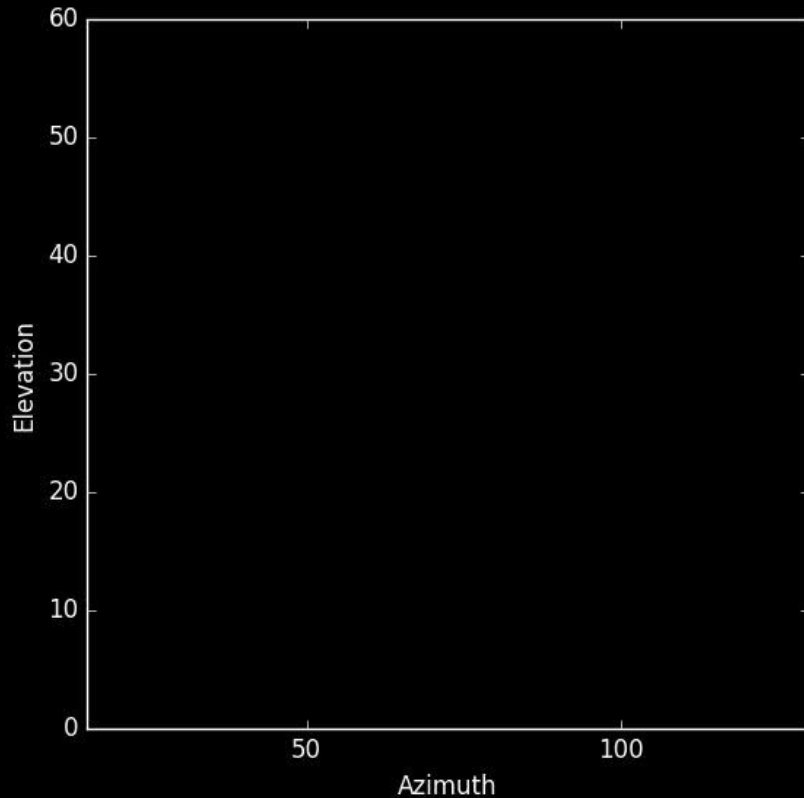


Raios Documentados



Como medimos os raios?

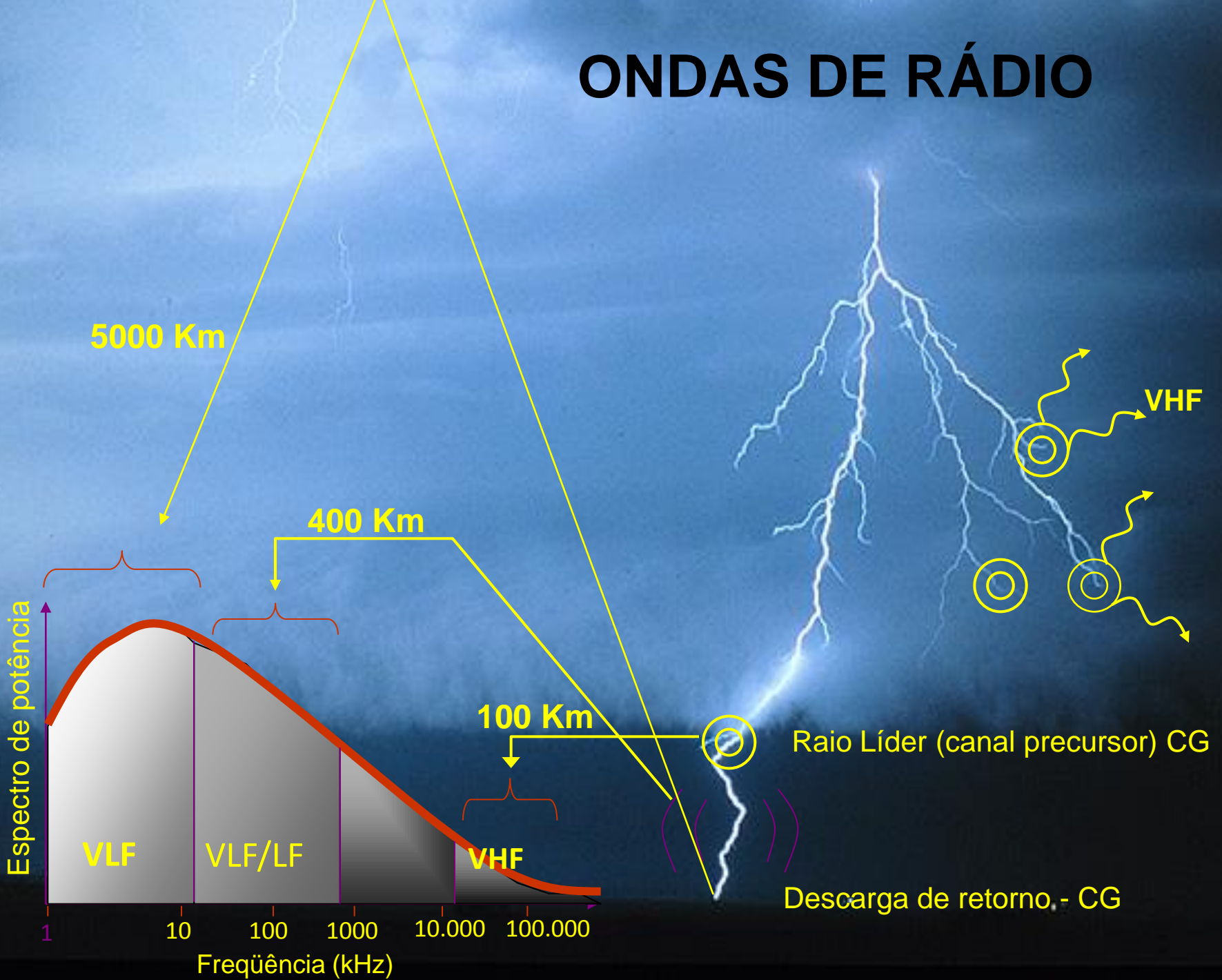
2017/05/13 20:21:49 UT
Frame Rate: 4000 fps
540.000



Cortesia

Broadband VHF Interferometry within the Kennedy Space Center Lightning Mapping Array – IDLC-2018
Mark Stanley¹, Paul R. Krehbiel¹, William Rison¹, Julia Tilles², Ningyu Liu², Robert G. Brown³, Jennifer Wilson³

ONDAS DE RÁDIO



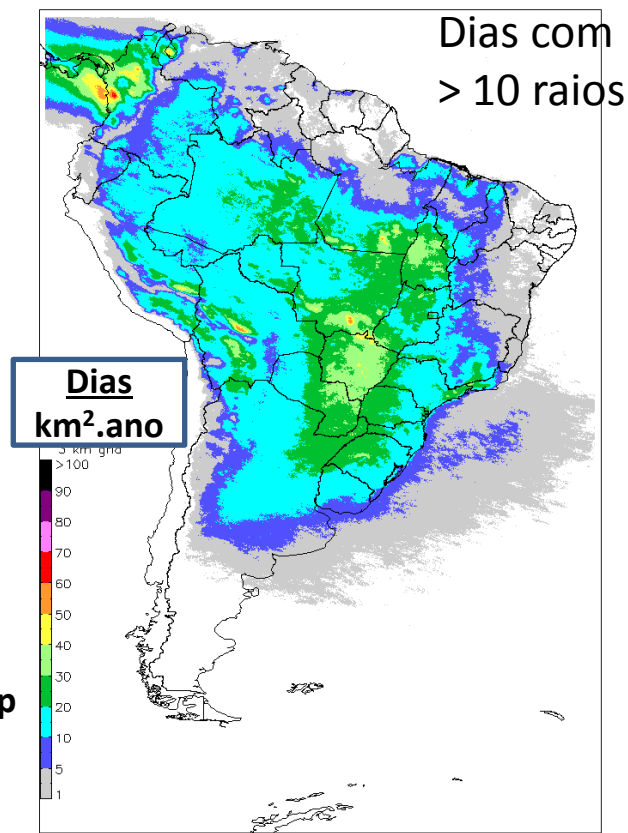
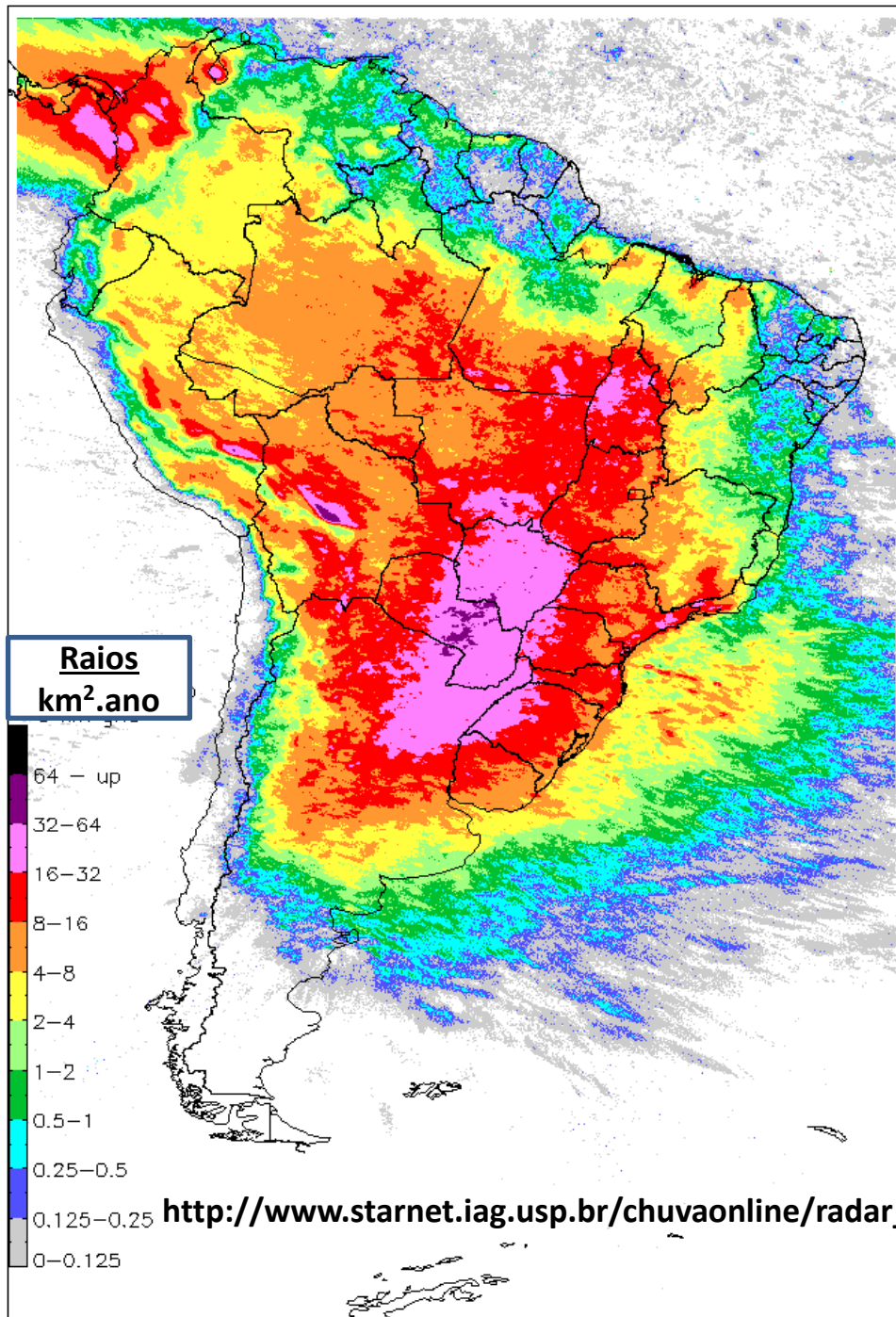
STARNET

- Sferics Timing And Ranging Network - **STARNET**
 - O STORM-T mantém e opera uma Rede de detecção de raios de longa distância baseada em medidas de VLF (Morales et al., 2011) desde o 2º semestre de 2016.
 - Desde 2018 a STARNET conta com 13 antenas de VLF instaladas na América do Sul, Africa, Caribe e EUA.
 - *STARNET cobre essencialmente a América do Sul, Oceano Atlântico e Pacífico, e Golfo do México*



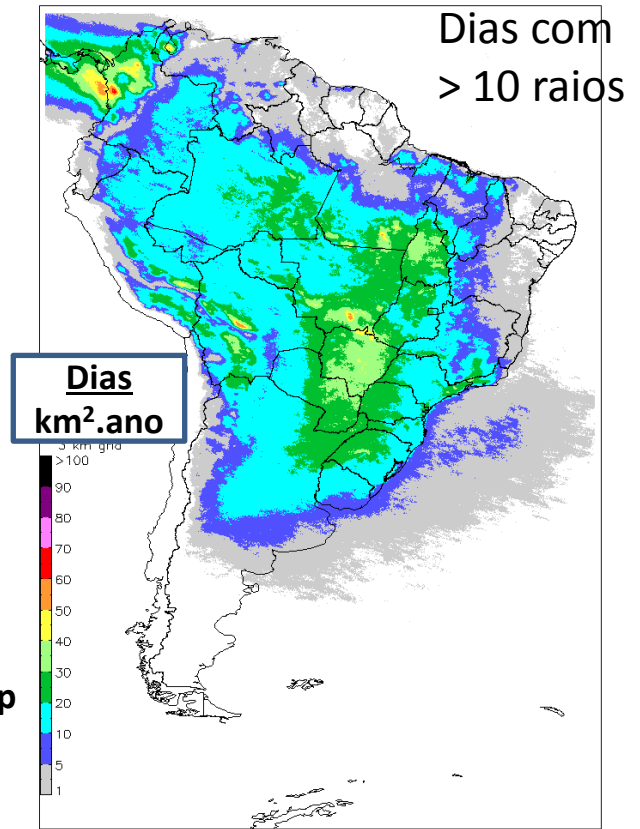
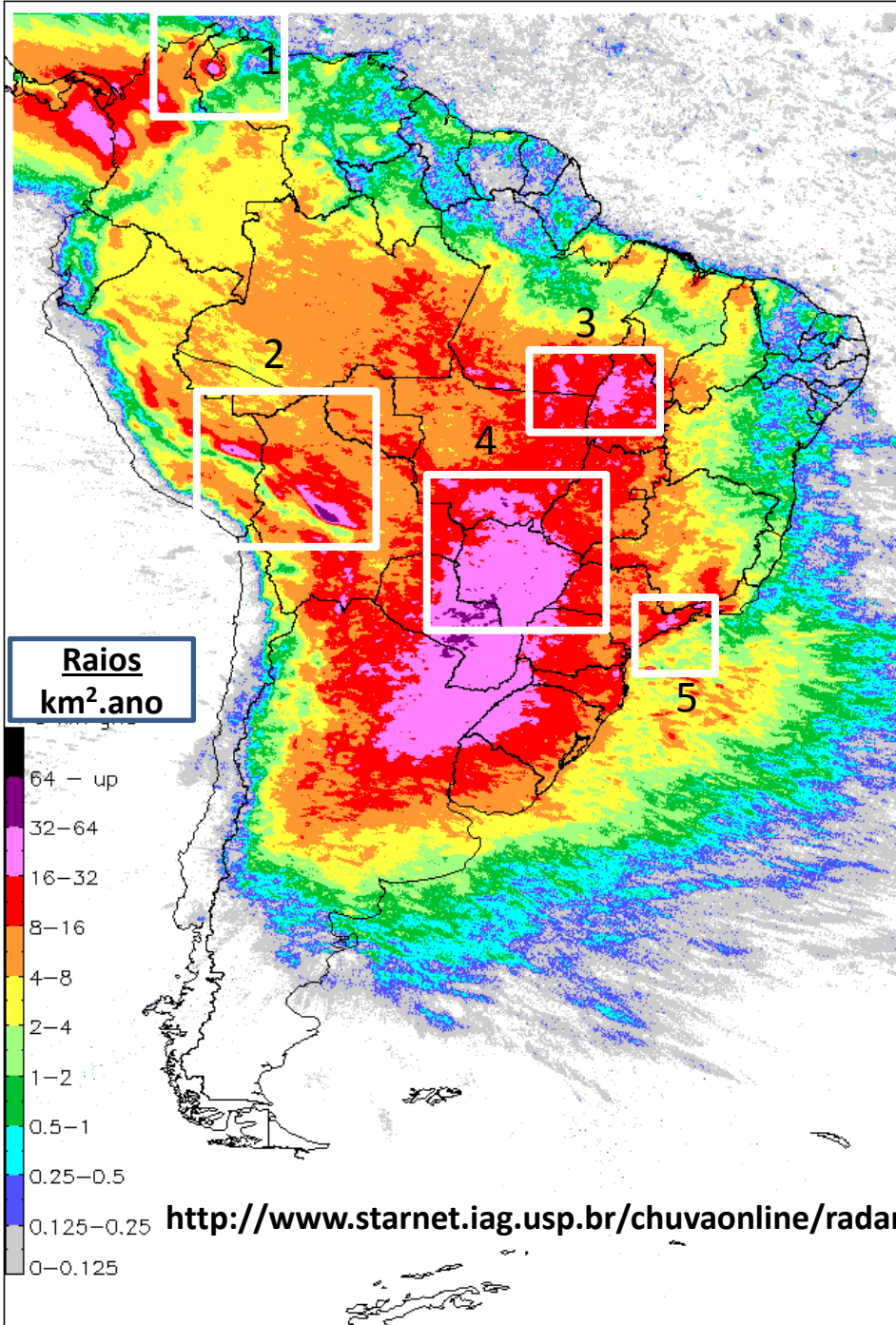
CLIMATOLOGIA

- 2012 – 2017
- Grade de 3 x 3 km²

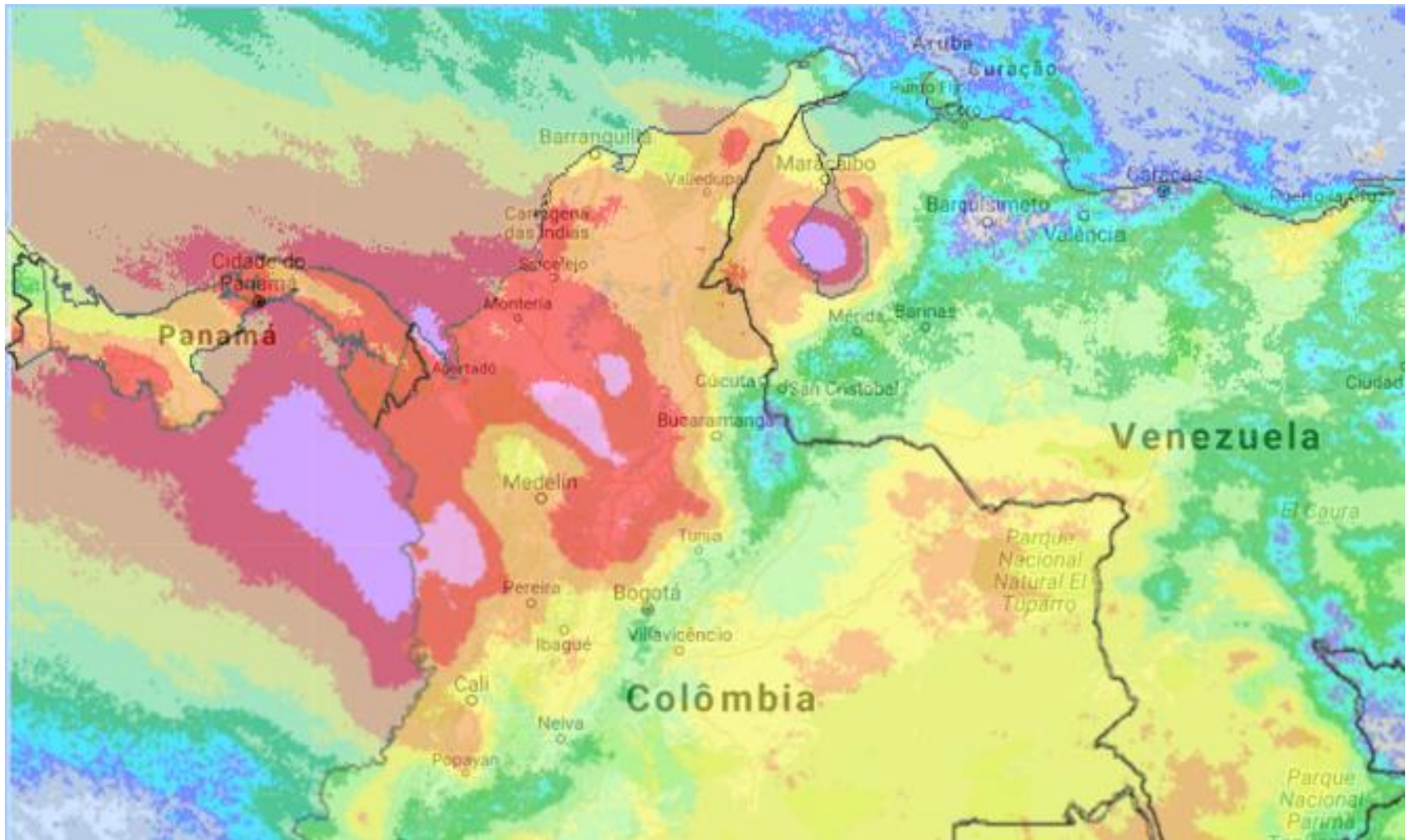


CLIMATOLOGIA

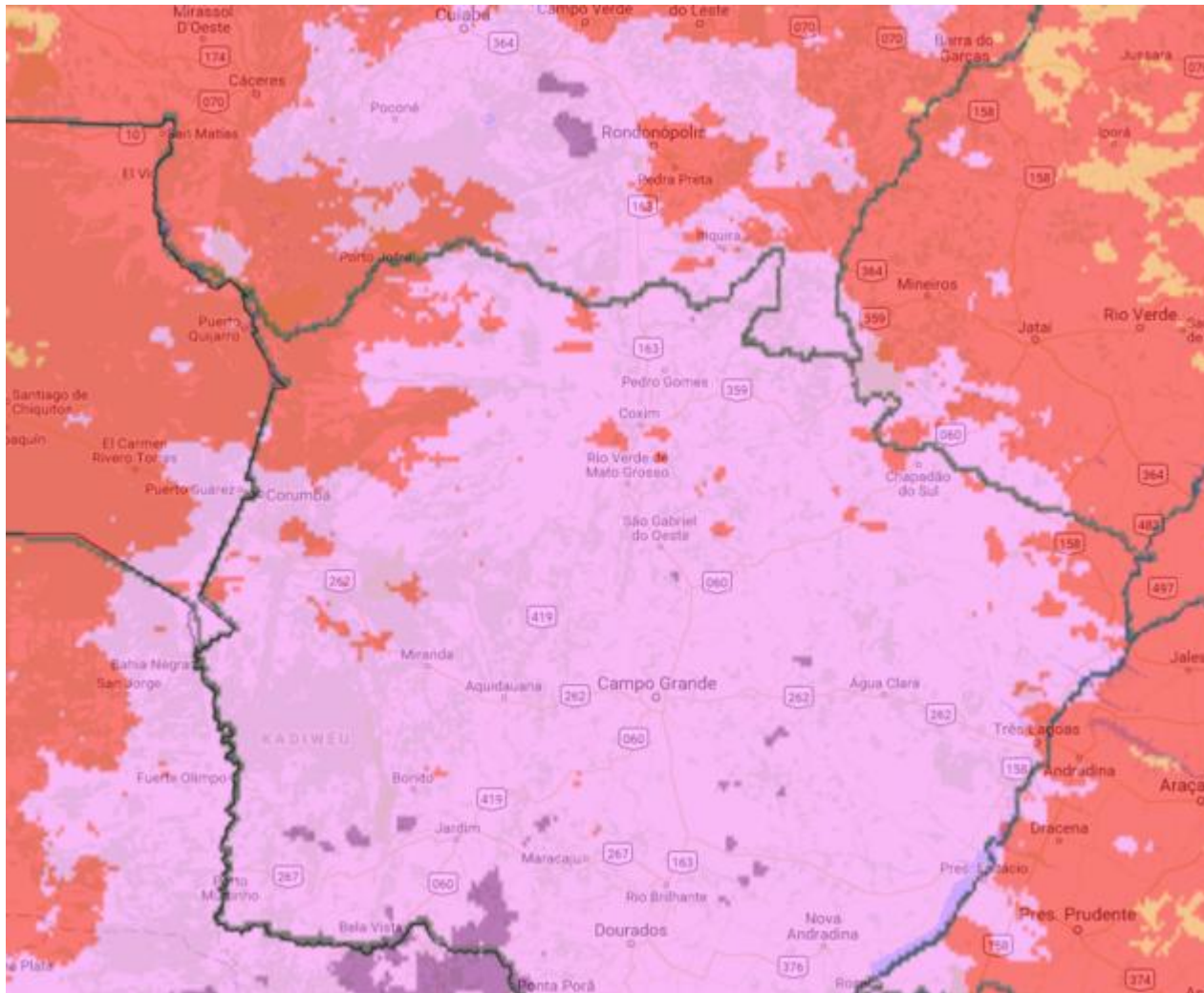
- 2012 – 2017
- Grade de 3 x 3 km²



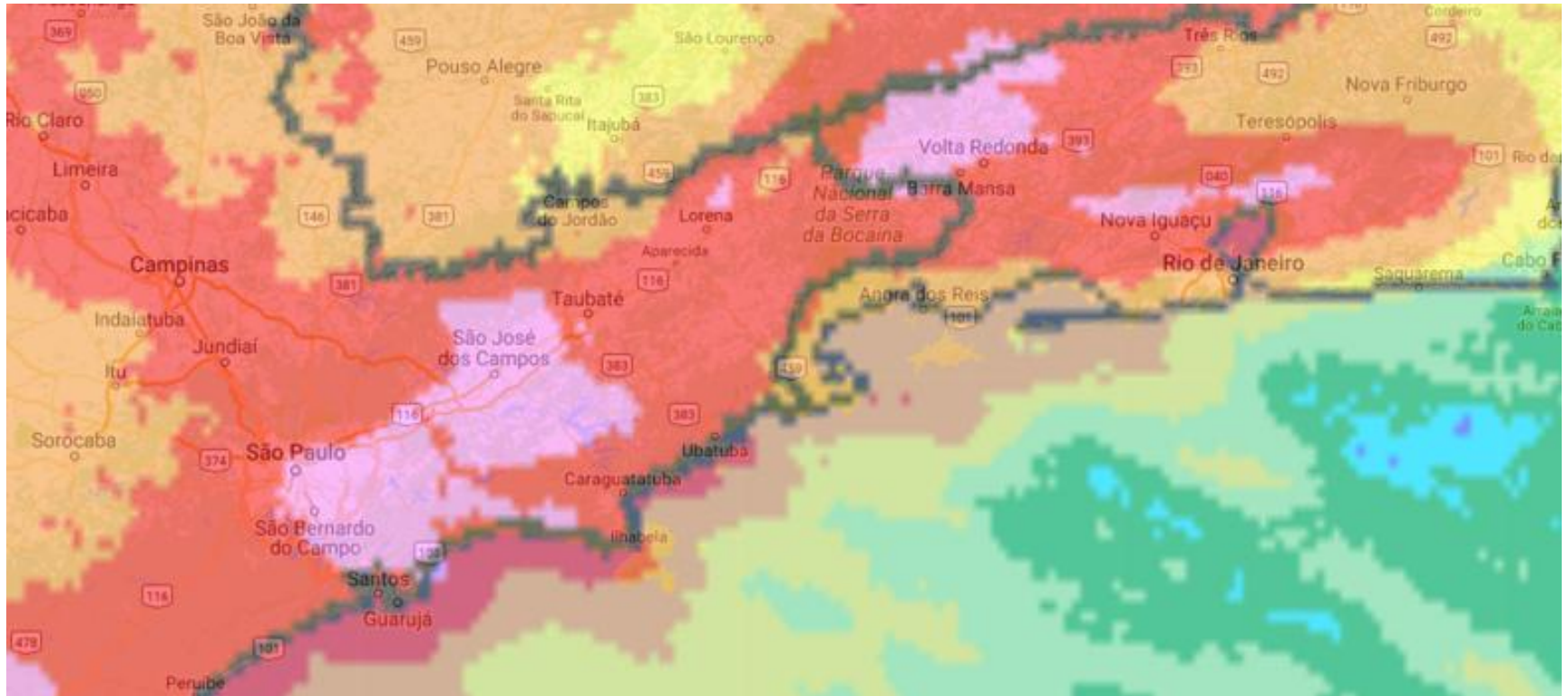
1- Colômbia e Venezuela



4 -Mato Grosso e Mato Grosso do Sul



5 -Vale do Paraíba

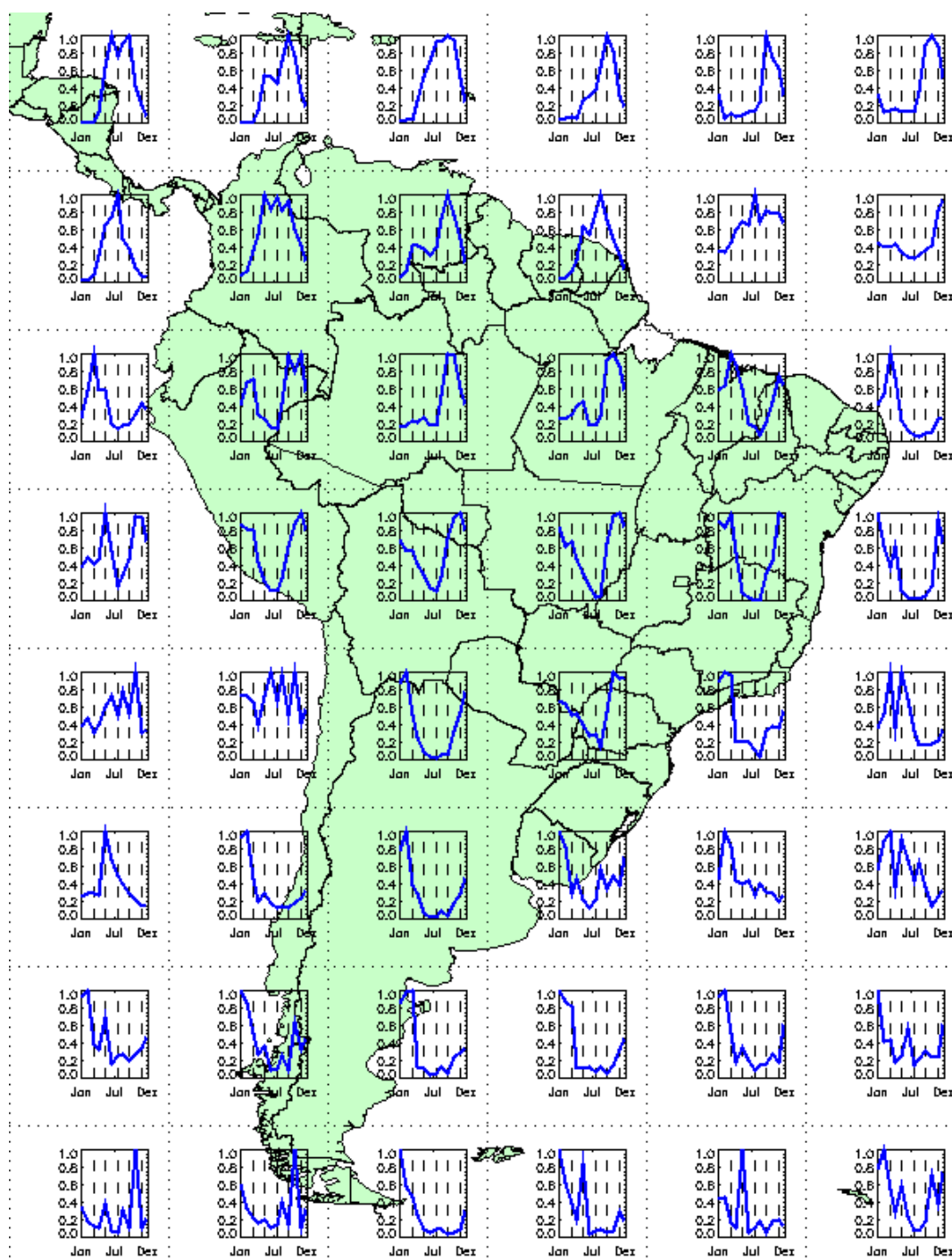


Oscilações Temporais

- Ciclo Anual
- Ciclo Diurno

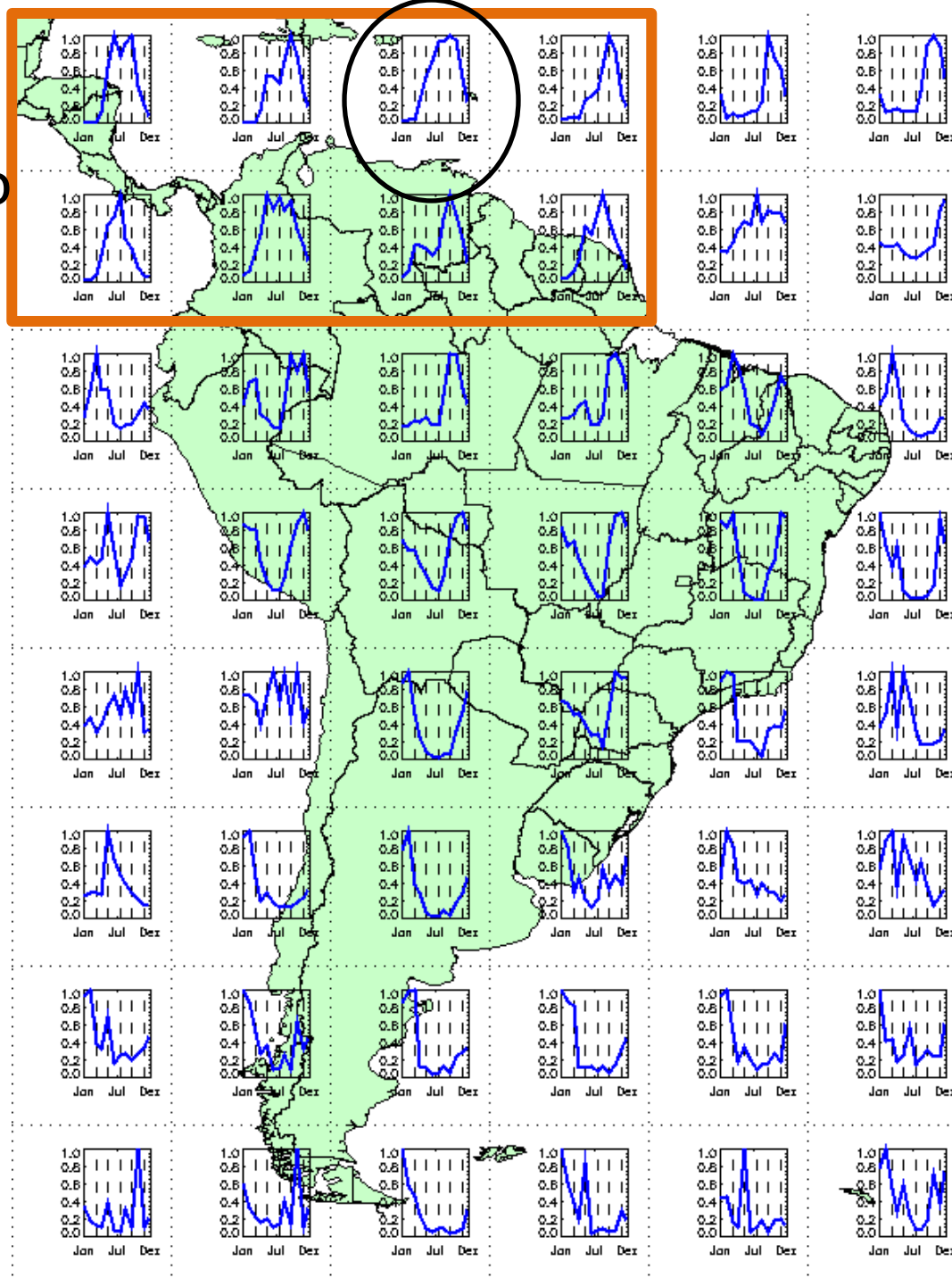
Ciclo Anual

Ciclo Anual



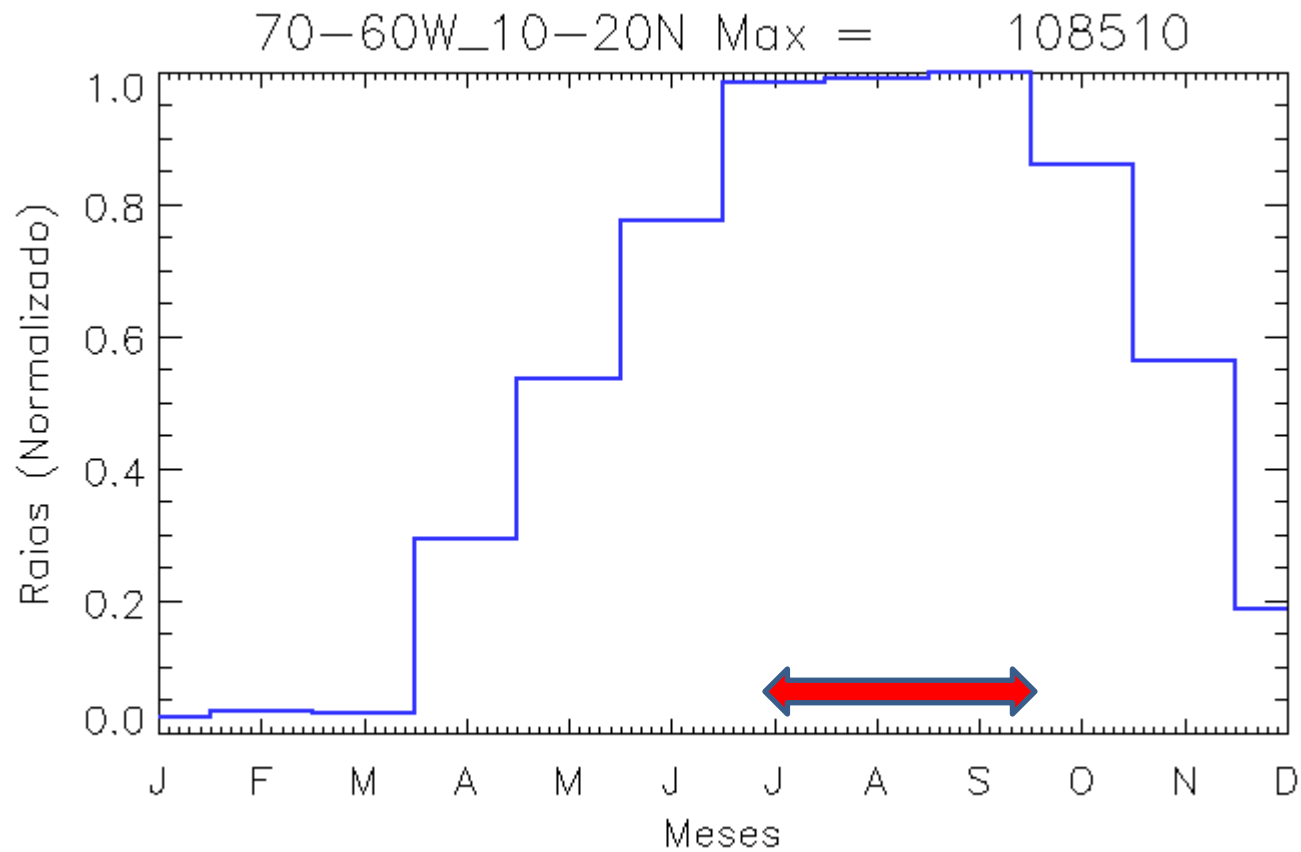
Verão
Hemisfério
Norte

*Ciclo
Anual*

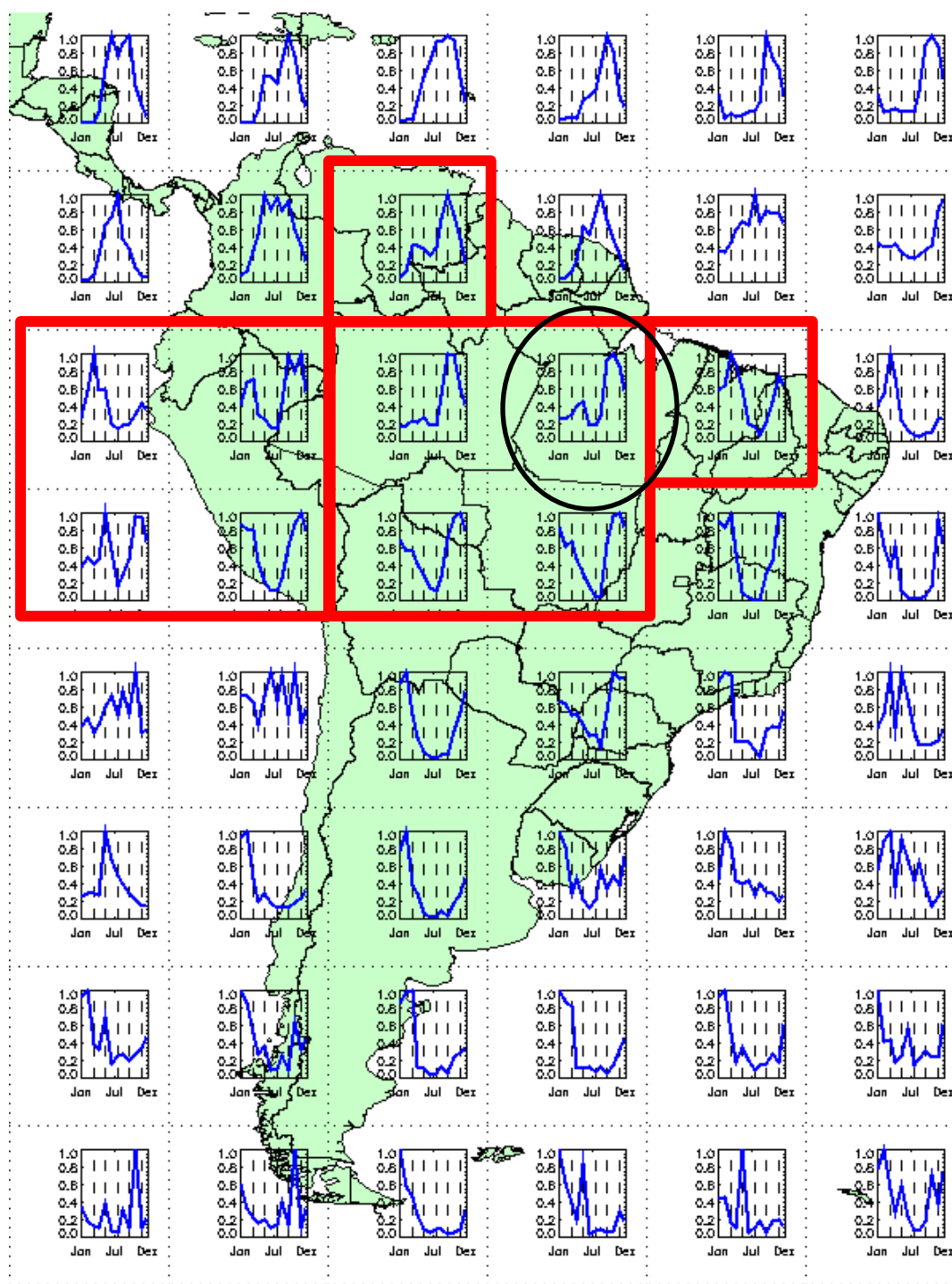


Verão
Hemisfério
Norte

**Ciclo
Anual**



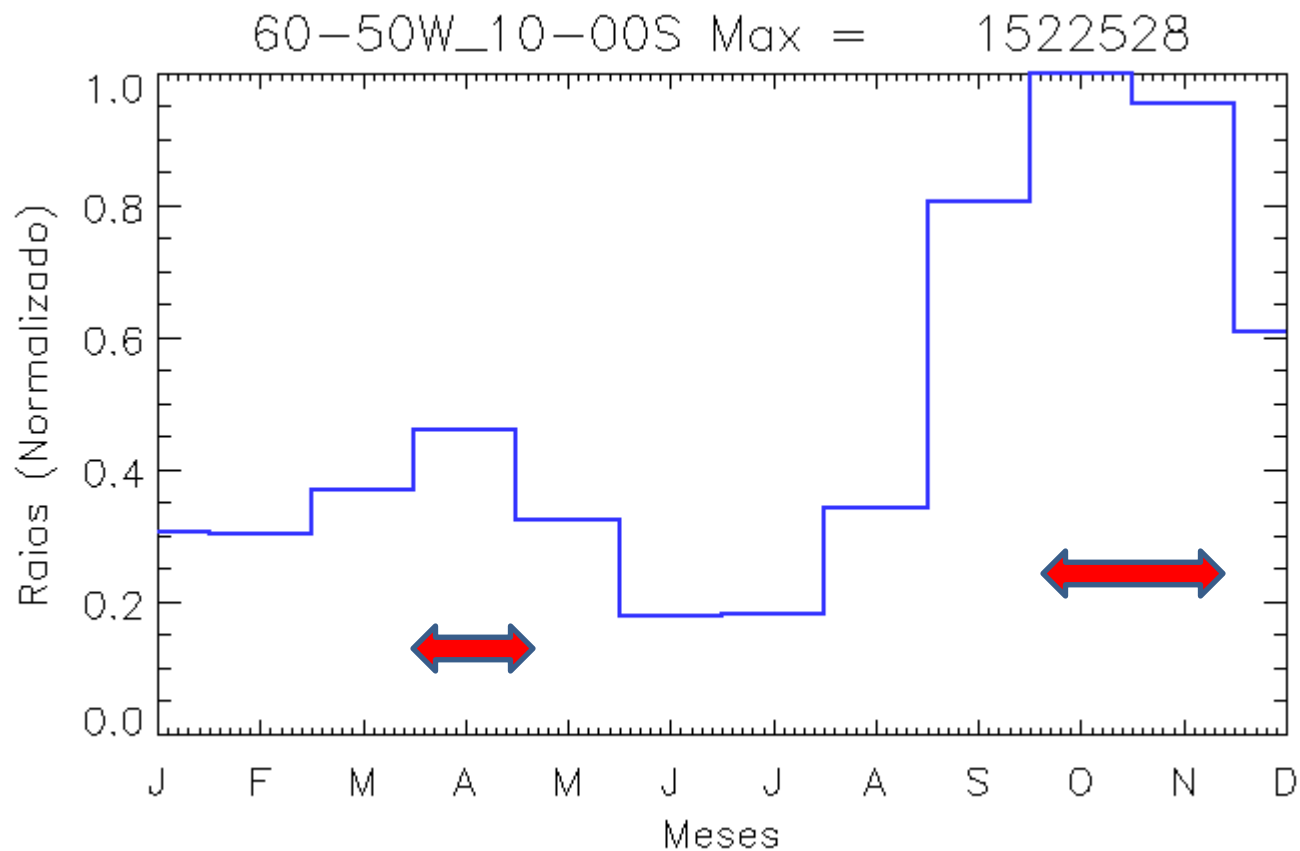
Ciclo Anual



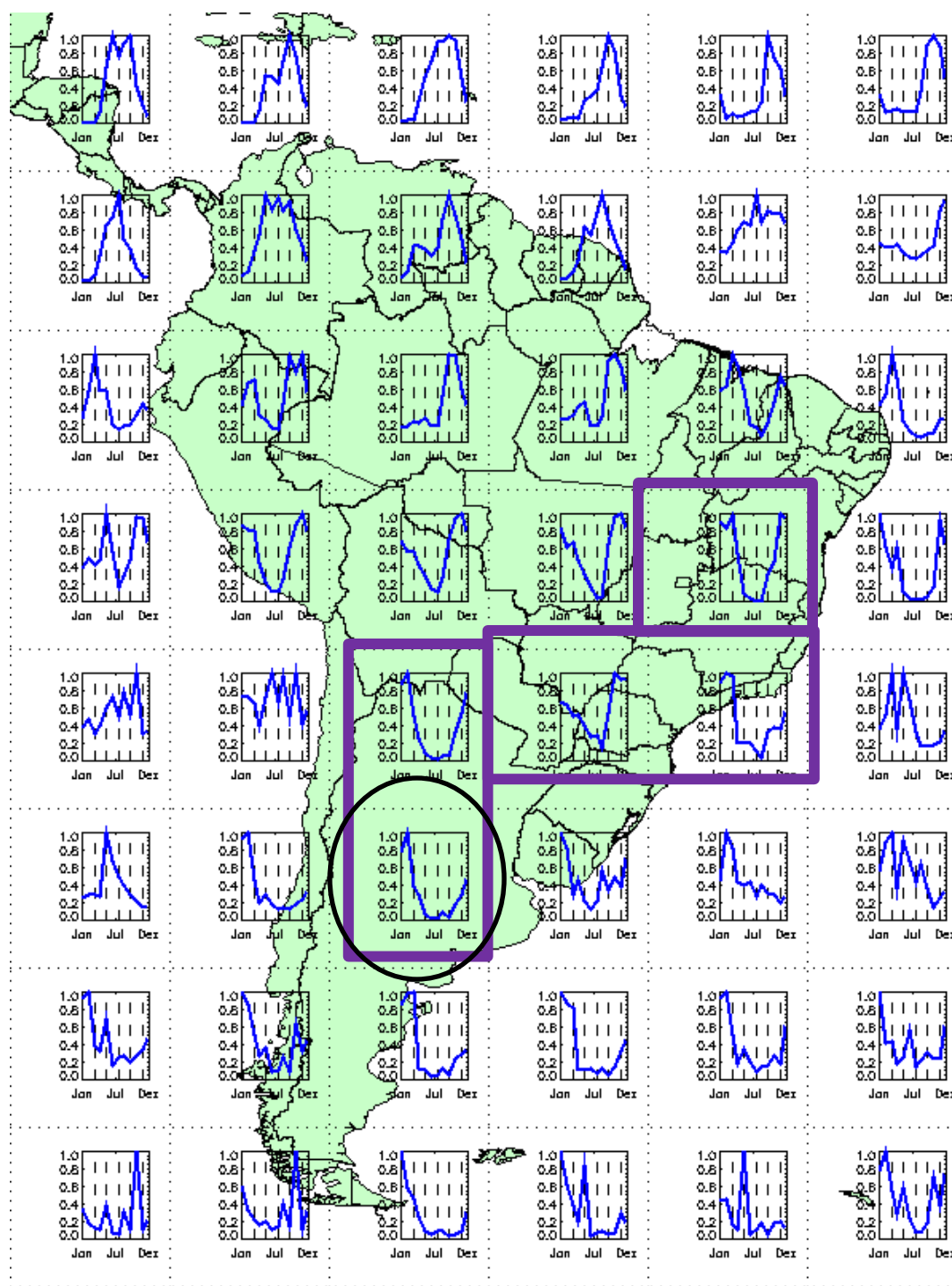
2 Máximos

Ciclo Anual

2 Máximos



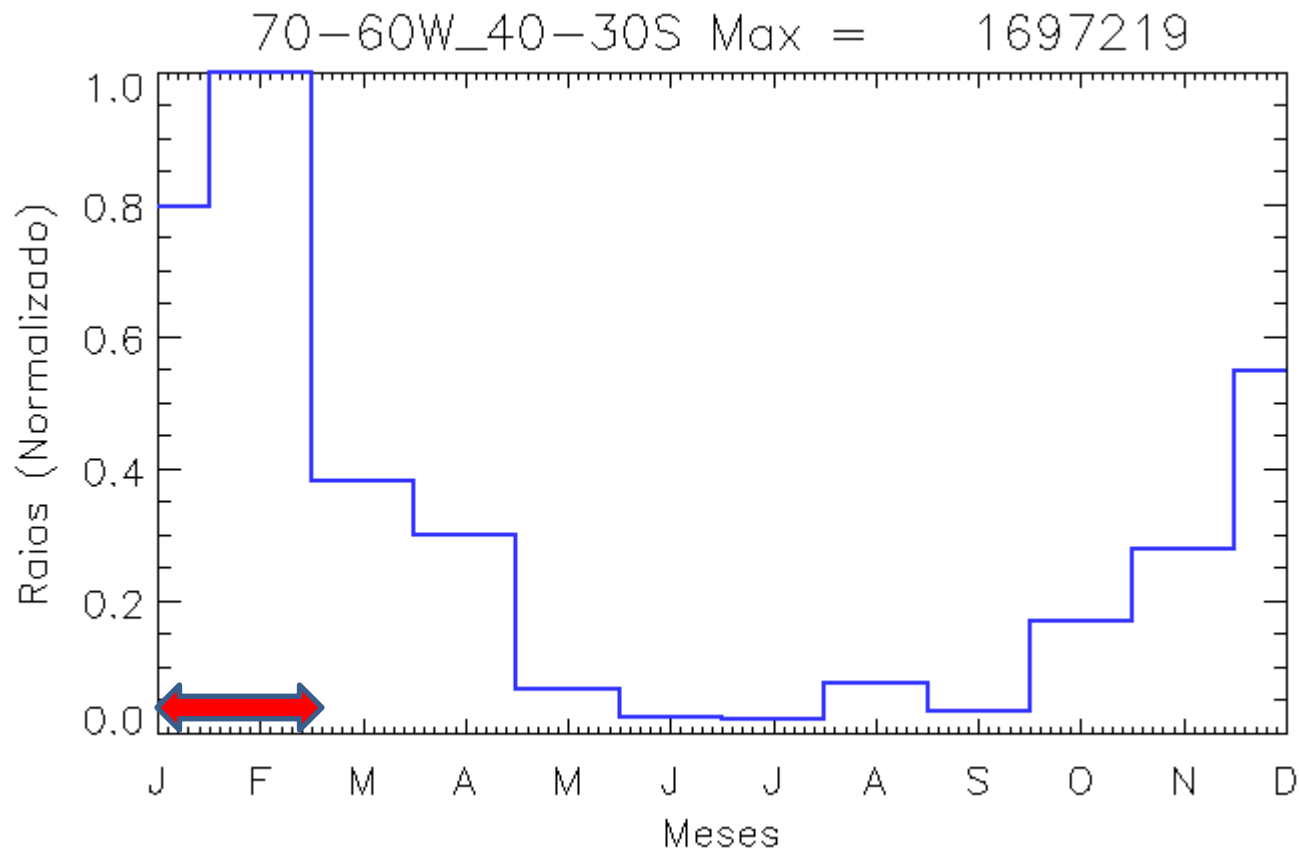
Ciclo Anual



Verão Hemisfério Sul

Ciclo Anual

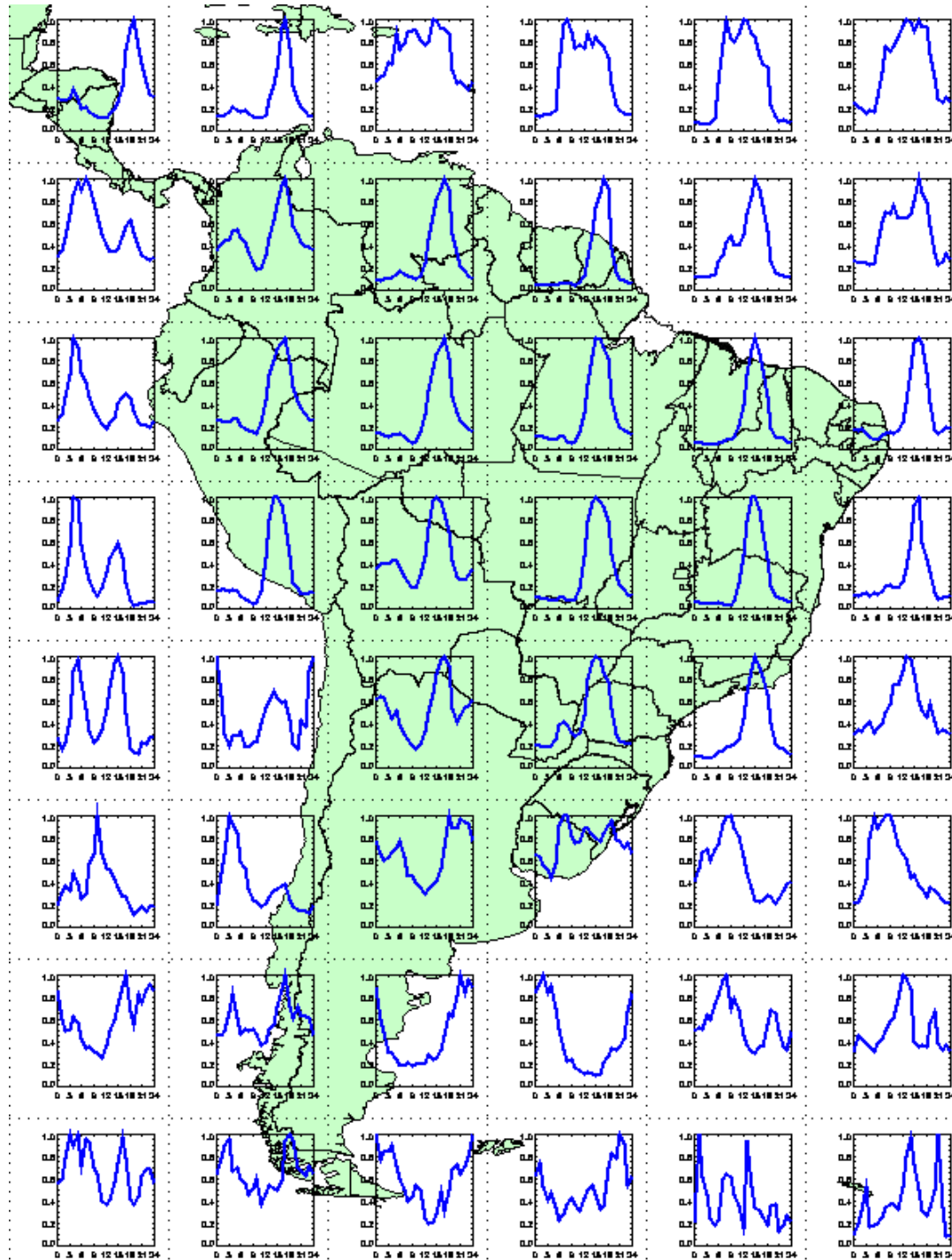
Verão Hemisfério Sul



Ciclo Diurno

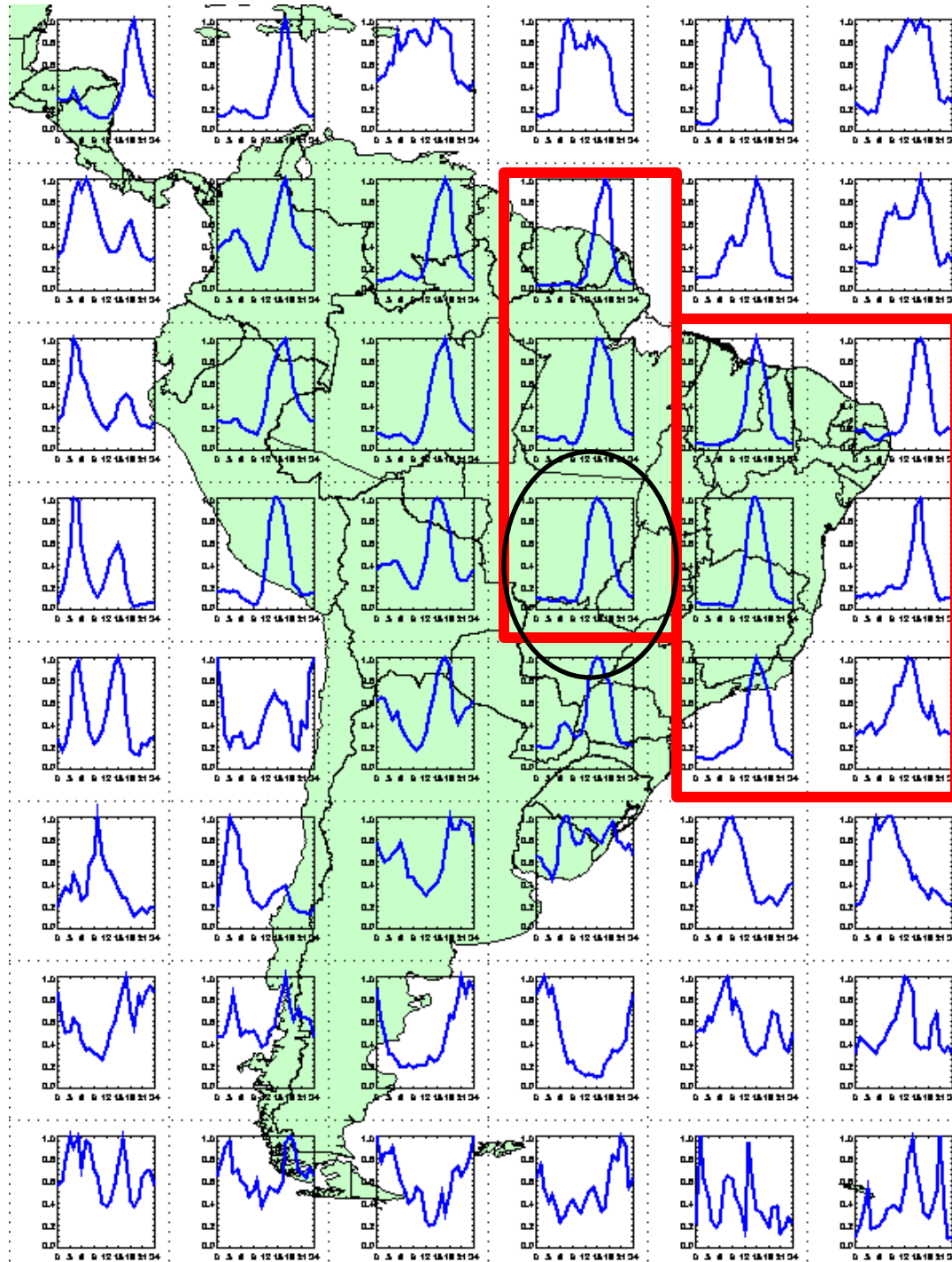
Ciclo Diurno

1 Máximo
2 Máximos
Sem definição



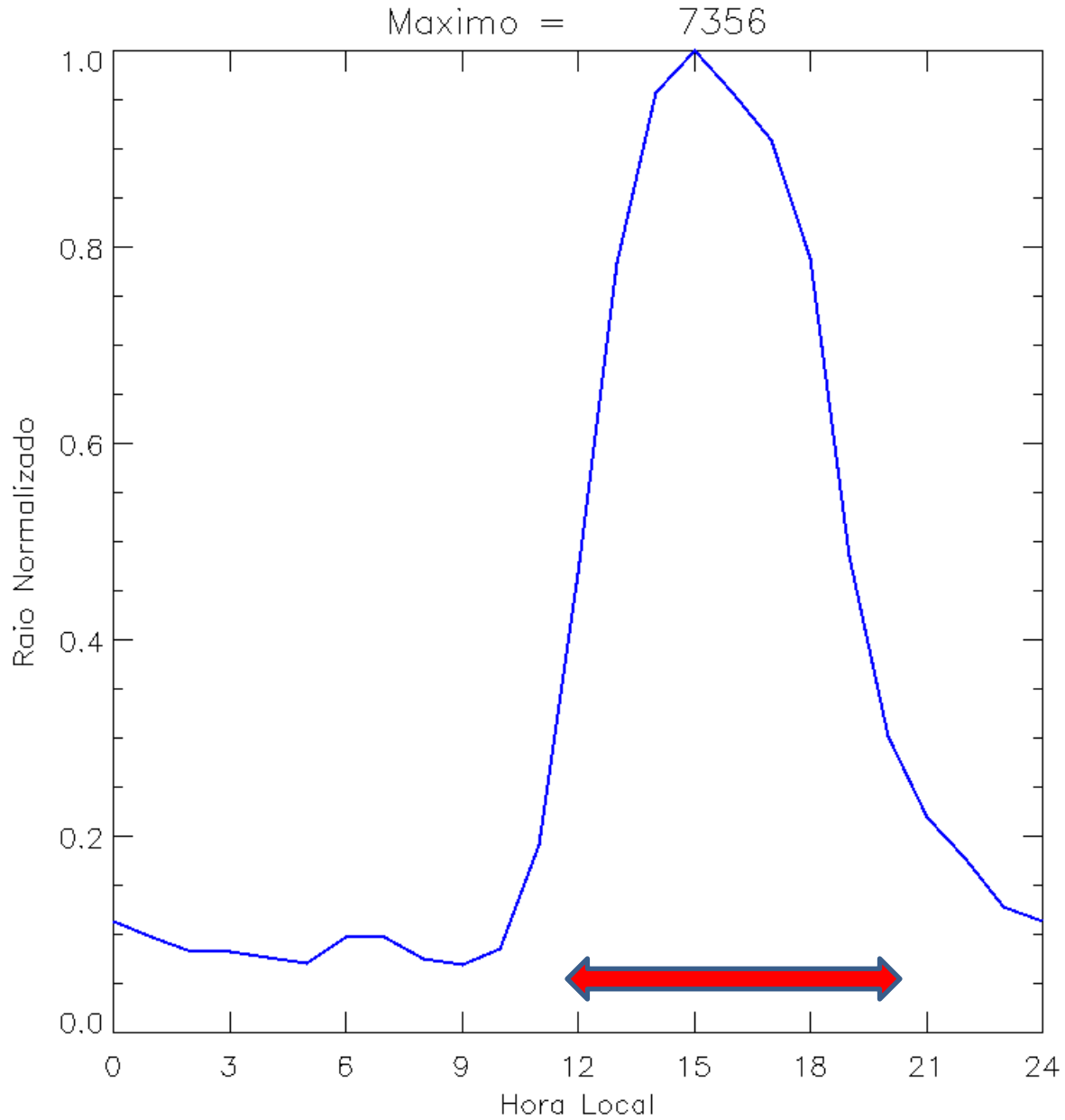
Ciclo Diurno

Tarde



Aquecimento diurno

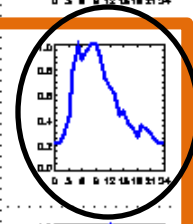
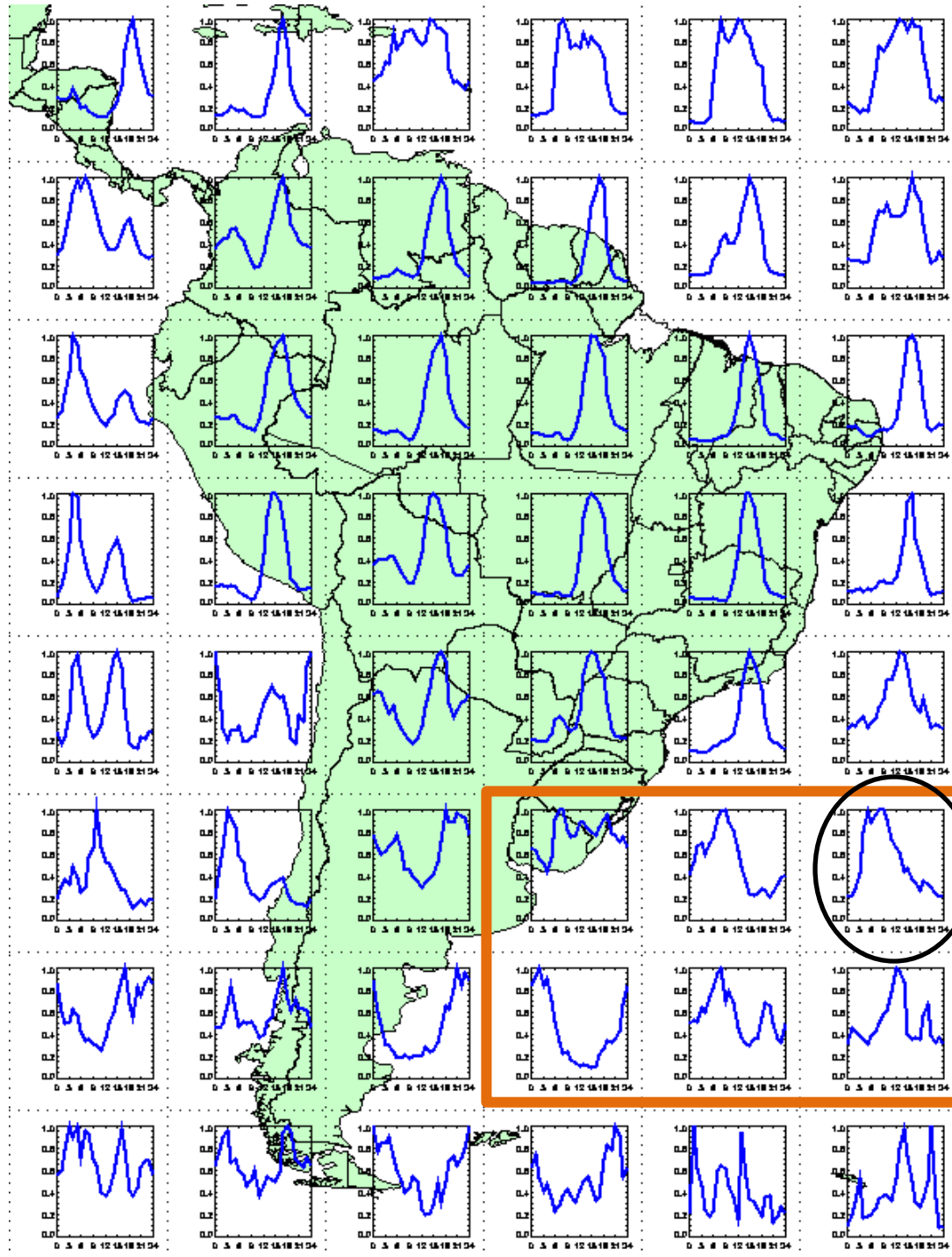
Ciclo Diurno



Tarde

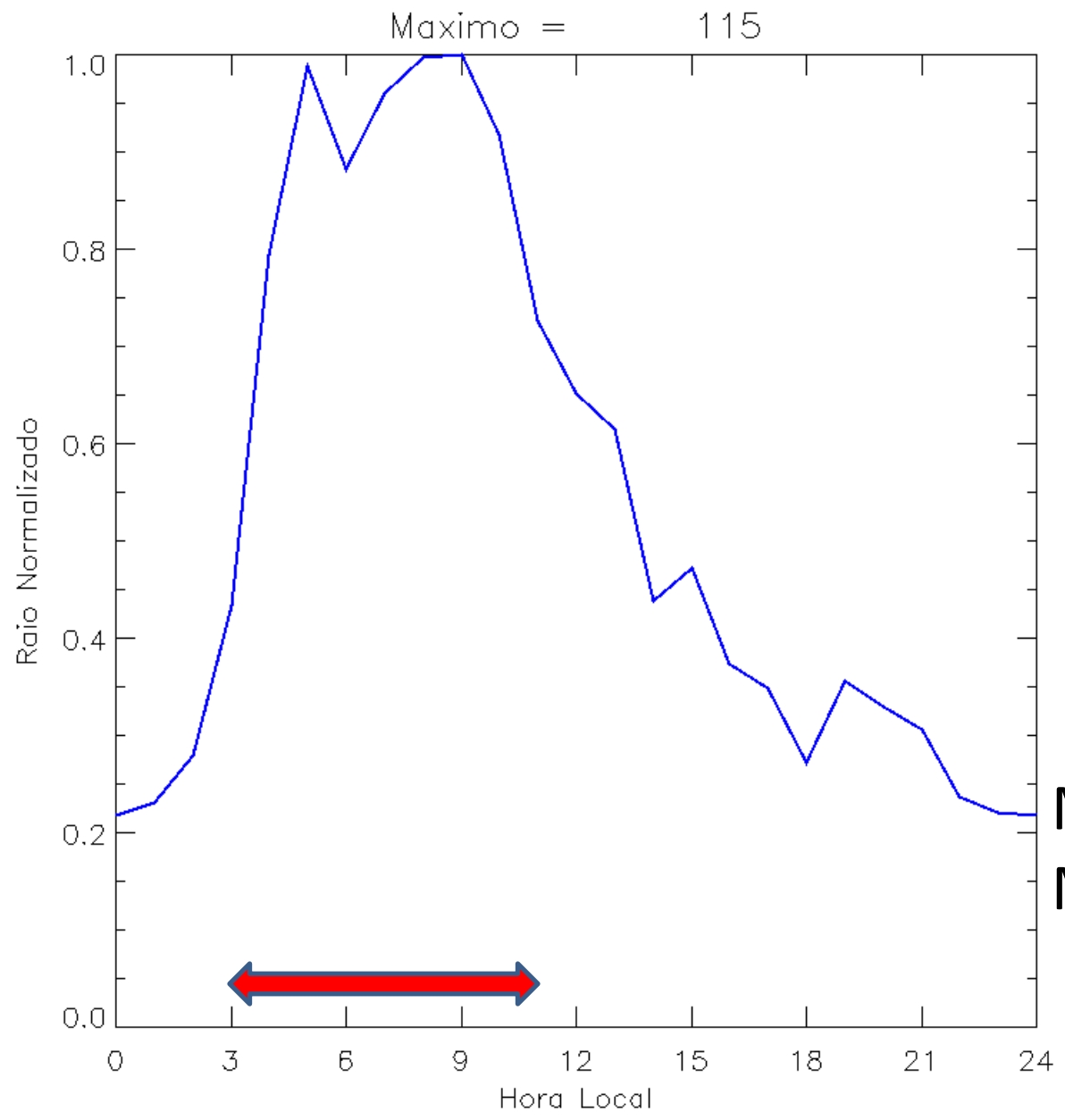
Ciclo Diurno

Radiativo e dinâmico



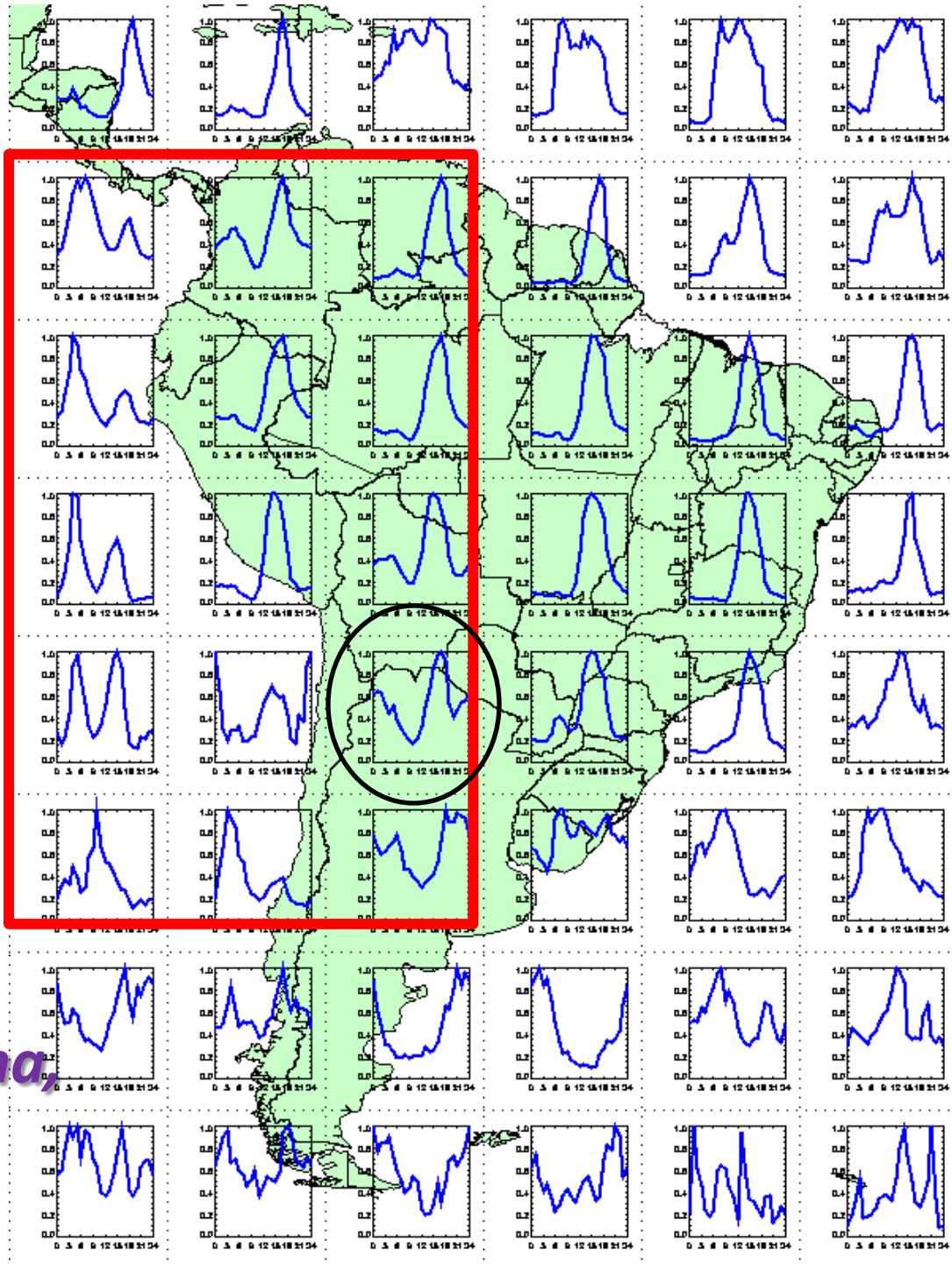
Madrugada

Ciclo Diurno



Madrugada
Manhã

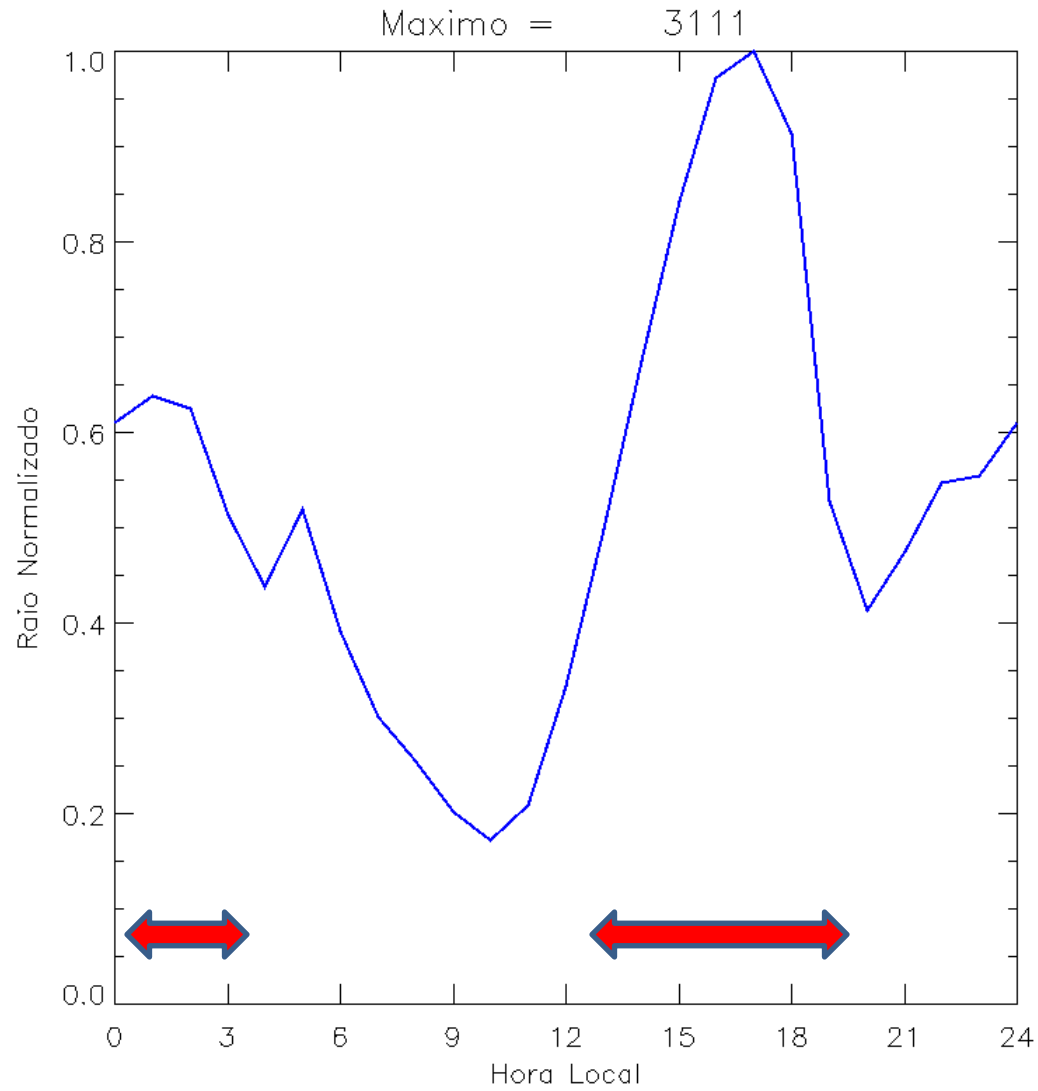
Ciclo Diurno



Tarde e Noite

Aquecimento Diurno, Orografia e Circulações Vale-Montanha, brisa

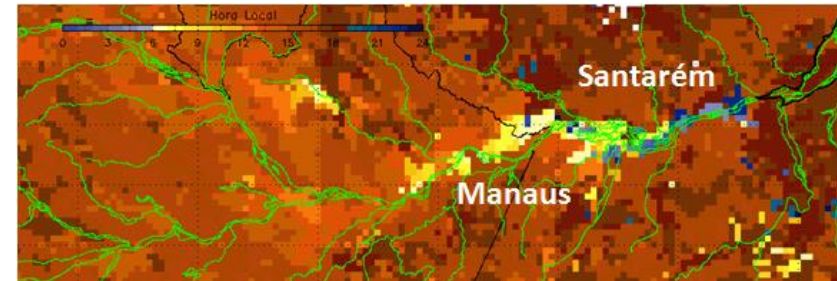
Ciclo Diurno



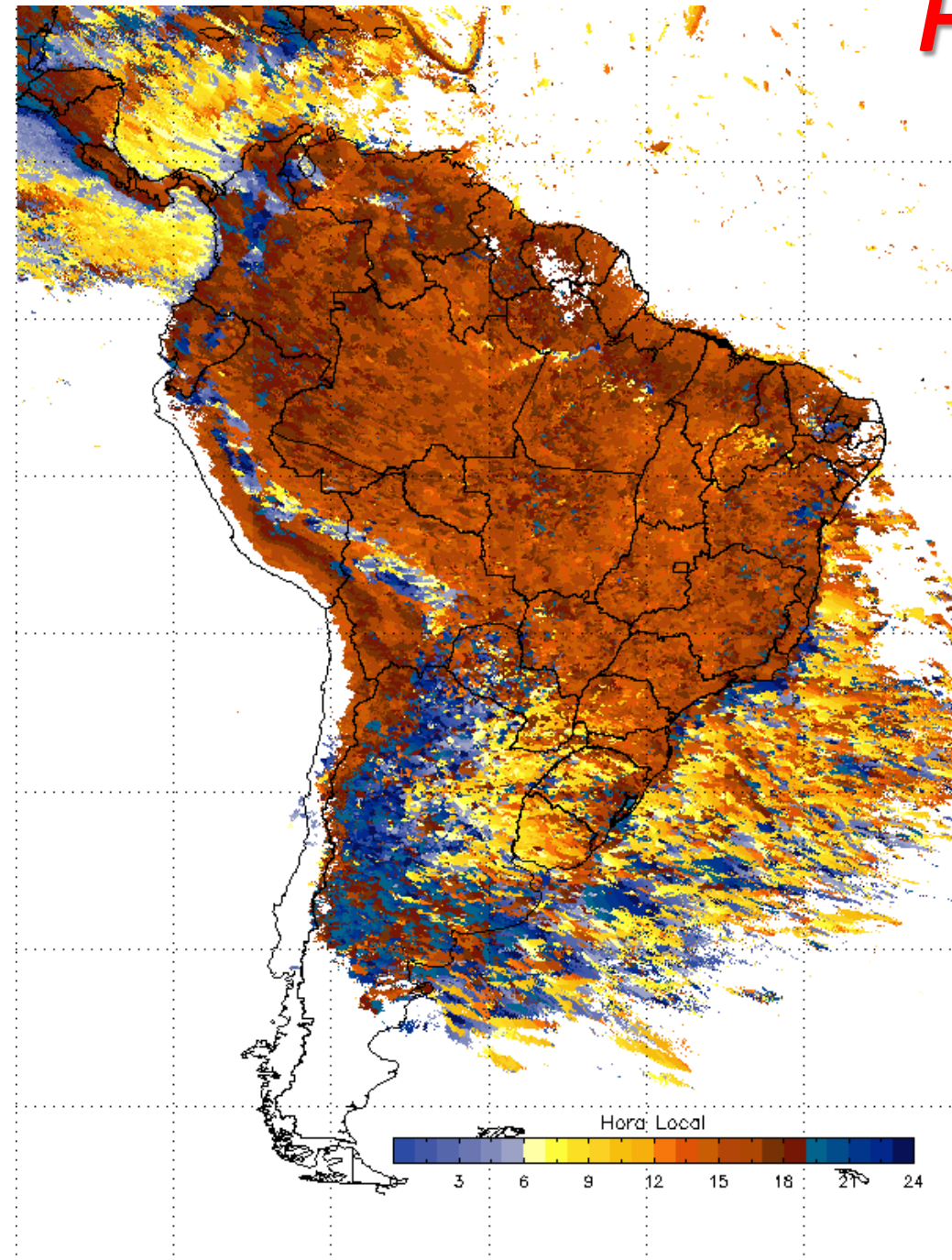
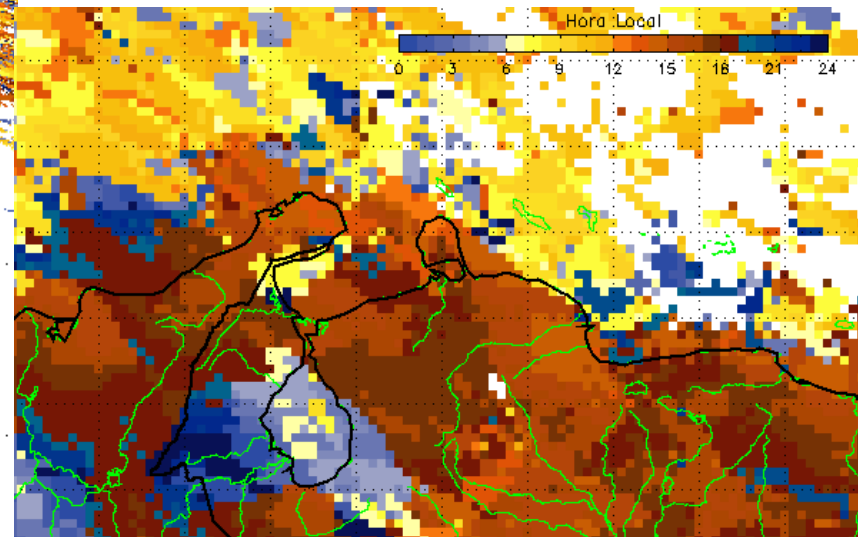
Tarde e Noite

Horário de Máxima Atividade Elétrica

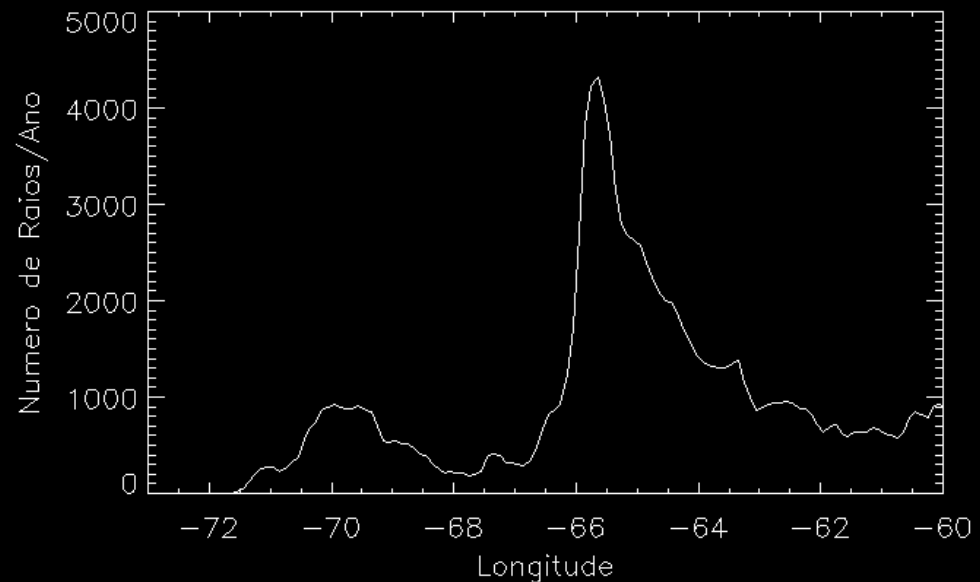
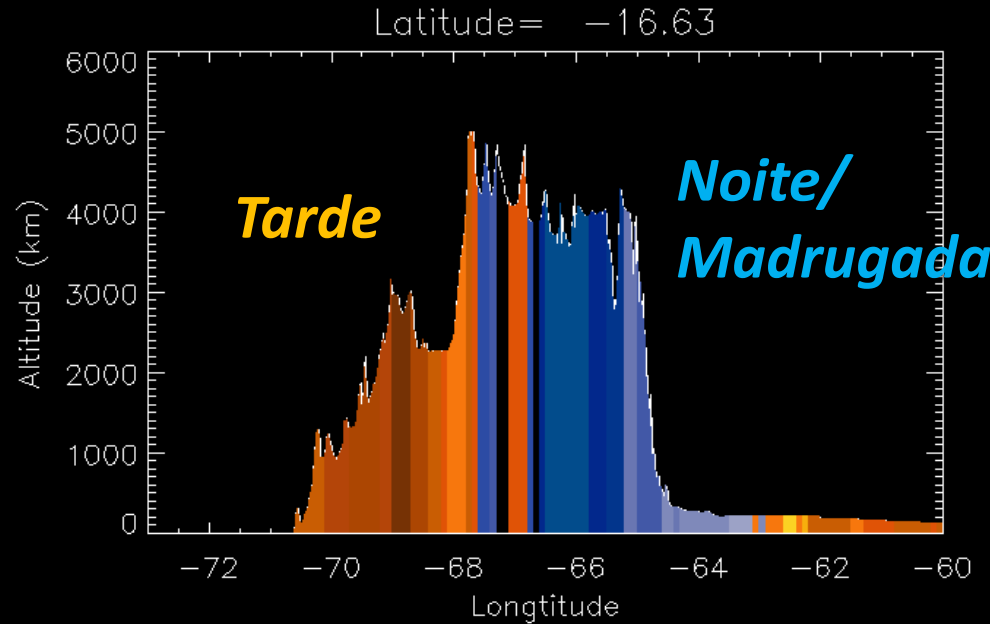
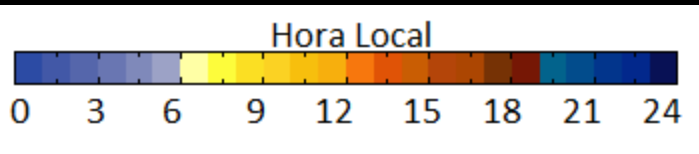
Rio Amazonas



Lago de Maracaíbo



Efeito da topografia e aquecimento diurno

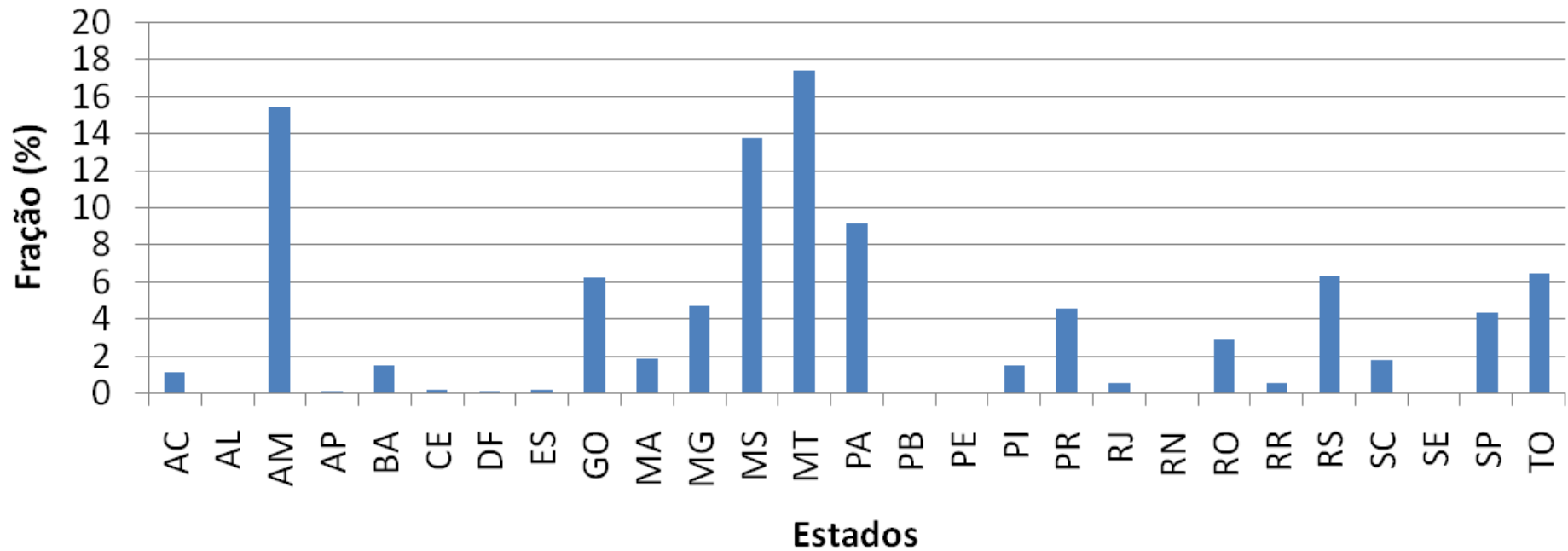


Ranking de raios no Brasil
~ 160 milhões de raios
nuvem-terra por ano

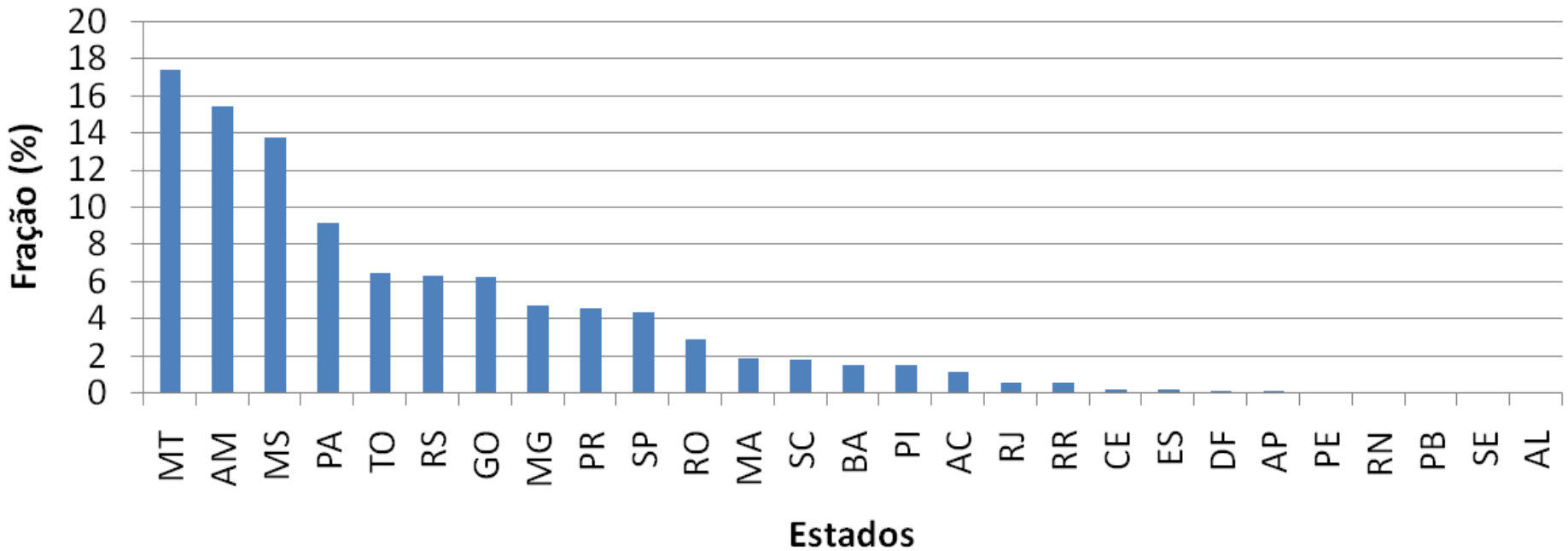
Estado	Número de Raios	Área (km ²)	Densidade (raios/km ²)	Fração (%)
AC	1.740.211	164.123,71	10,603	1,08
AL	12.723	27.848,16	0,457	0,01
AM (2º)	24.710.649	1.559.149,07	15,849	15,40
AP	98.474	142.828,52	0,689	0,06
BA	2.319.460	564.732,64	4,107	1,45
CE	247.411	148.887,63	1,662	0,15
DF	131.363	5.780,00	22,727	0,08
ES	201.600	46.089,39	4,374	0,13
GO	9.920.154	340.110,39	29,167	6,18
MA	2.910.351	331.936,96	8,768	1,81
MG	7.451.769	586.521,24	12,705	4,64
MS (3º)	22.048.883	357.145,53	61,736	13,74
MT (1º)	27.910.743	903.198,09	30,902	17,39
PA (4º)	14.678.349	1.247.955,38	11,762	9,15
PB	25.806	56.468,43	0,457	0,02
PE	62.777	98.076,00	0,640	0,04
PI	2.309.897	251.611,93	9,180	1,44
PR	7.262.026	199.307,99	36,436	4,52
RJ	872.091	43.781,57	19,919	0,54
RN	60.014	52.811,11	1,136	0,04
RO	4.592.294	237.765,38	19,314	2,86
RR	812.817	224.301,08	3,624	0,51
RS (6º)	10.050.600	281.737,95	35,674	6,26
SC	2.847.980	95.737,90	29,748	1,77
SE	21.360	21.918,45	0,975	0,01
SP	6.935.403	248.222,00	27,940	4,32
TO (5º)	10.260.297	277.720,57	36,945	6,39

Total no Brasil
160.495.503

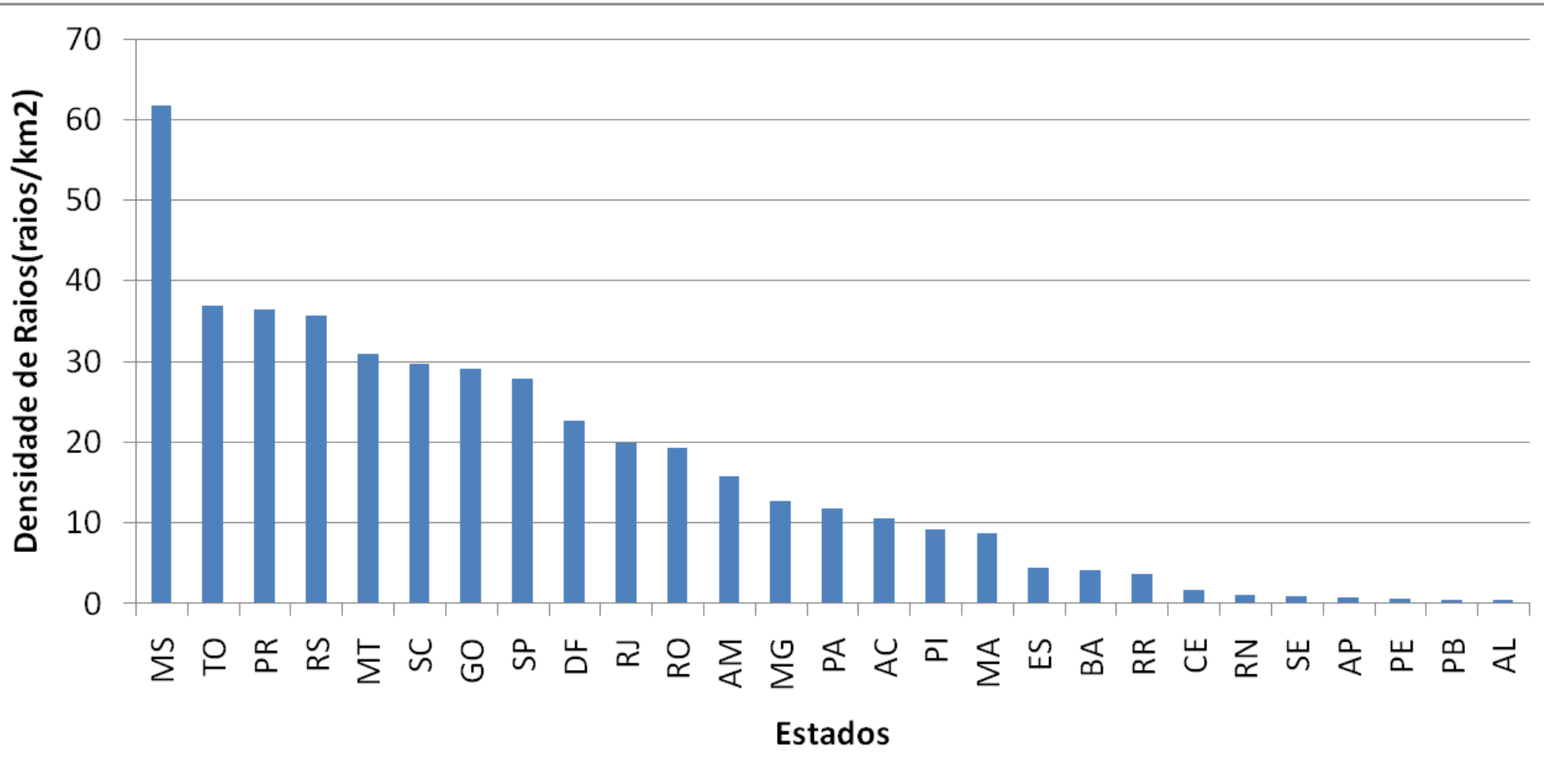
Contribuição Estadual no total de Raios



Contribuição Estadual no total de Raios



Qual estado tem maior densidade de raios

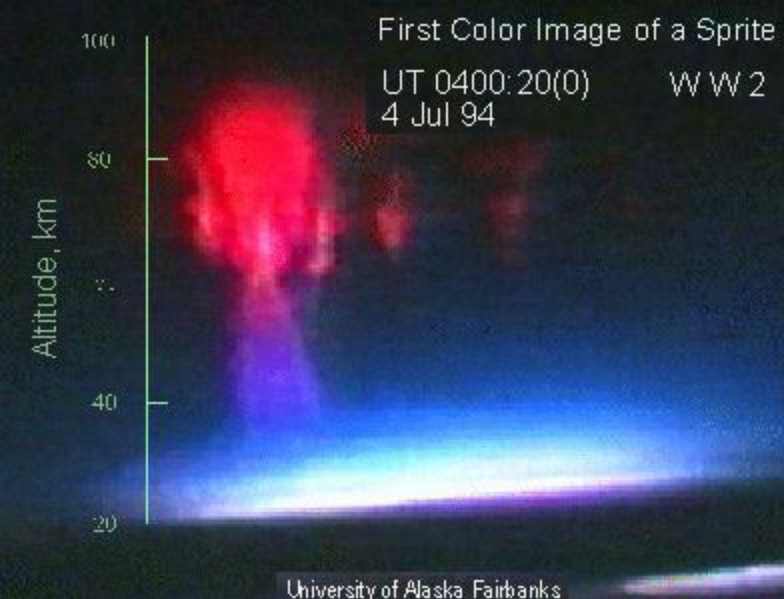


Top 10 - Número de Raios

Ordem	Município	Estado	Área (km2)	Número de Raios Ano	Densidade Média Raios (raios/km2/ano)	Densidade Mínima Raios (raios/km2/ano)	Densidade Máxima Raios (raios/km2/ano)
1	Corumbá	MS	67.426,49	1.140.817	17,521	9,063	31,696
2	Altamira	PA	163.462,17	804.337	5,055	0,213	34,793
3	São Félix do Xingu	PA	85.496,46	758.836	8,937	1,048	27,969
4	Tapauá	AM	100.968,14	563.723	6,236	3,445	9,271
5	Jacareacanga	PA	55.789,12	547.829	10,164	4,727	21,092
6	Apuí	AM	57.745,47	494.323	9,098	4,542	14,739
7	São Gabriel da Cachoeira	AM	128.973,66	449.758	4,084	1,73	6,797
8	Ribas do Rio Pardo	MS	17.636,43	438.151	25,011	16,596	35,111
9	Porto Murtinho	MS	18.458,28	434.058	24,065	16,511	34,697
10	Barcelos	AM	136.109,95	428.255	3,493	0,269	8,274

Top 10 - Densidade de Raios

Ordem	Município	Estado	Área (km2)	Número de Raios Ano	Densidade Média Raios (raios/km2/ano)	Densidade Mínima Raios (raios/km2/ano)	Densidade Máxima Raios (raios/km2/ano)
1	Amaralina	GO	1.421,62	18.305	13,55	7,26	56,57
2	Novo Santo Antônio	MT	4.410,10	58.385	12,91	8,64	56,54
3	Serra Nova Dourada	MT	1.496,52	21.187	13,90	9,21	53,59
4	Faxinal	PR	723,20	9.707	13,08	11,25	51,33
5	Bom Jesus do Araguaia	MT	4.333,71	55.654	12,95	9,14	48,69
6	Planaltina	GO	2.541,18	20.170	7,20	5,18	43,13
7	Canarana	MT	11.000,54	142.419	13,34	10,07	42,59
8	Uruçuí	PI	8.445,89	29.220	3,44	1,32	39,73
9	Rolante	RS	298,82	2.607	8,98	6,67	39,59
10	Sto Antônio do Leverger	MT	12.639,25	297.465	23,88	14,88	39,23



Obrigado
carlos.morales@iag.usp.br

<http://www.starnet.iag.usp.br>

