



Relatório Final

Título do projeto de pesquisa: Estudo das Variações do Campo Elétrico Atmosférico na região Leste do Estado de São Paulo

Bolsista: Victor Silva Tona de Abranches

Orientador(a): Marco Antonio da Silva Ferro

Período a que se refere o relatório: Agosto de 2014 a julho de 2015

Resumo

O trabalho proposto tem como objetivo criar um critério para disparos de alerta de possíveis ocorrências de relâmpagos sobre grande parte da Região Metropolitana do Vale do Paraíba na região Leste do Estado de São Paulo.

Isto foi feito através de análises de dados obtidos de sensores de campo elétrico atmosférico durante os meses de janeiro a abril de 2014, nas quais se buscou o que houve de comum entre os primeiros relâmpagos incidentes de cada tempestade, além de as caracterizar como provenientes de uma frente fria ou se começaram de uma convecção local.

1. Introdução

A maior parte dos acidentes com relâmpagos acontecem no começo ou no fim de uma tempestade, porque não se sabe quando um primeiro, ou último, relâmpago vai ocorrer (Holle et al., 1992). Isso acontece porque durante a tempestade, a ocorrência da descarga elétrica é mais previsível, pelo fato de já terem sido observados relâmpagos em momentos próximos uns dos outros, resultando em menos acidentes. Essa conclusão também é confirmada por Lengyel, 2004, que mostrou que mais da metade dos acidentes com relâmpagos resultam do primeiro ou um dos primeiros relâmpagos NS em uma tempestade e que um significativo número de acidentes resultaram do retorno às atividades externas um pouco antes da atividade de relâmpagos ter realmente cessado.



Existem diversos métodos para a criação de critérios de alerta para ocorrência de relâmpagos, como por exemplo utilizar a localização das incidências (Murphy and Cummins, 2000; Murphy et al., 2002; Holle et al., 2003), o número total de relâmpagos (Murphy and Holle, 2005 e 2006), ou a variação de campo elétrico atmosférico medido por sensores (Murphy et al., 2008; Montanya et al., 2008; Beasley et al., 2008; Aranguren et al., 2009), cujas medidas são bastante influenciadas pelo local onde foram instalados. Os fatores que influenciam nas medições variam desde a topologia à altura do centro de carga da nuvem, levando à conclusão de que as informações obtidas podem variar de região para região.

Buscando avaliar como a informação da variação do campo elétrico atmosférico pode auxiliar no processo de emissão de alerta sobre o risco de ocorrência de relâmpago, Ferro et al. (2010) compararam a informação de um EFM instalado numa área específica com informações de relâmpagos NS fornecidas pela rede brasileira de detecção de descargas atmosféricas – BrasilDAT.

A partir da redução e análise dos dados, obtidos a partir da utilização de uma rede de sensores de campo elétrico atmosférico (EFM – do inglês Electric Field-Mill) numa região específica, será possível propor um sistema, bem como definir critérios a serem utilizados pelo sistema proposto, de modo a dar suporte para a tomada de decisão de emissão de alertas de risco de relâmpagos para uma área de interesse, como por exemplo, avaliando as porcentagens de falhas na emissão de alertas para várias magnitudes do campo elétrico atmosférico utilizadas como nível crítico para o disparo dos mesmos.

Atualmente já existe um sensor em funcionamento, cujos alertas foram disparados de forma eficiente em 60% dos relâmpagos incidentes na região. Acredita-se que com um número maior de sensores a eficiência possa ser maior, pelo fato de os dados de campo elétrico atmosférico se complementarem para uma maior área analisada, e, como os sensores são relativamente próximos, em algumas regiões ocorre uma sobreposição de medidas, melhorando ainda mais a eficiência. O projeto está baseado no funcionamento integrado deste número maior de sensores.

2. Material e métodos

Como principais materiais foram utilizados os sensores mostrados na Figura 1 abaixo, cujos dados já são armazenados compatíveis com o Excel.



Figura 1 – À esquerda o sensor modelo CS 110, de fabricação Campbell Scientific, e à direita o sensor modelo EFM 550, de fabricação Vaisala.

Os dados obtidos são referentes aos meses de janeiro a abril de 2014 por ser este o primeiro verão no qual os sensores operaram ininterruptamente, e os seus códigos de identificação, o proprietário e o meio utilizado para a comunicação com o servidor estão listados na Tabela 1 a seguir, e sua distribuição pela região do Vale do Paraíba está representada na imagem 2.

Tabela 1 – Sensores da Rede de Monitoramento do Campo Elétrico do Vale do Paraíba

#	initials	Site	Owner	Comm.
1	IGA	Igaratá	DCTA	LAN
2	STB	Santa Isabel	DCTA	LAN
3	GRM	Guararema	DCTA	LAN
4	IAE	Torre IAE	DCTA	LAN+GSM
5	JCR	Jacareí	DCTA	GSM
6	HTO	Horto SJC	DCTA	GSM
7	UCA	Usina Cel. Abner	DCTA	GSM
8	MOG	Mogi das Cruzes	INPE	GSM
9	SLS	Salesópolis	INPE	GSM
10	PRB	Paraibuna	INPE	GSM
11	CPV	Caçapava	INPE	GSM
12	TST	Torre IAE	INPE	GSM

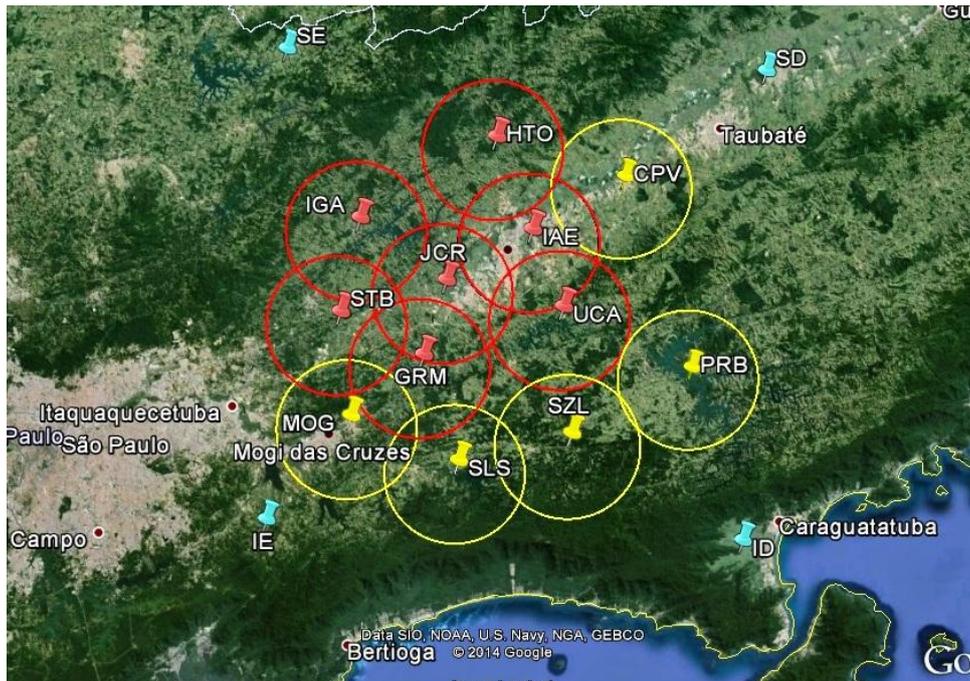


Figura 2– Área de cobertura da Rede de Monitoramento do Campo Elétrico Atmosférico. Vermelho: sensores CS 110 instalados pela ACA/IAE. Amarelo: sensores EFM 550 instalados pelo INPE. Pinos azuis definem a área de cobertura da rede de monitoramento considerada neste trabalho.

Para iniciar os trabalhos, primeiro foi feita uma separação dos dados brutos referentes a cada mês, para facilitar a divisão e análise dos resultados, e, durante esse processo, foram eliminados os dados repetidos e os inconsistentes que surgiram por uma eventual falha dos dataloggers, localizados em campo, junto aos sensores, e que fazem a transmissão automática das medidas para o banco de dados.

Feita esta separação, o próximo passo foi dividir os dados em tempestades distintas, usando como critério o tempo de ocorrência de um relâmpago para o seguinte. Se o horário medido para um determinado relâmpago diferir do horário do anterior por um tempo de 30 minutos, ou mais, considera-se que ambos ocorreram em tempestades distintas.

Para tentar determinar um critério de disparo de alerta eficiente, focado nos primeiros relâmpagos de cada tempestade, este projeto buscou atuar de duas formas: ver se a tempestade na qual ele ocorreu é resultante de uma frente fria, que já vinha percorrendo

outras regiões não alcançadas pelos sensores, ou se ela se originou em algum local próximo, de forma independente, por uma convecção local.

2.1 Análise das tempestades

Para essa classificação foram analisadas imagens de satélite e de radar. Para fazer a diferenciação das tempestades, busca-se determinar o primeiro relâmpago numa determinada região. Uma vez encontrado, foi utilizado o critério de existência ou não de outras descargas elétricas antecedendo-o em algum local próximo.

Caso essa descarga existisse, o relâmpago em questão era classificado como proveniente de “Sistema se aproximando”, vindo de outras localidades.

A Figura 3, a seguir, mostra um trecho da planilha com as informações dos relâmpagos, destacando a tempestade 124 como um exemplo de um caso de “Sistema se Aproximando”. O primeiro relâmpago ocorrido na área da rede está indicado em vermelho. Os relâmpagos estão ordenados sequencialmente segundo o instante de ocorrência. A última coluna à direita da planilha mostra a distância, em quilômetros, entre o relâmpago e o local de impacto do primeiro ocorrido na área da rede.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	
1	tempestade	ano	mes	dia	hora	minuto	segundo	nanosegundo	latitude	longitude	corrente	pico	flag_intranuvem	distancia
8602														
8603	124	2014	03	01	17	37	40	209	-23.3065	-45.3942	-17	0	31.04	
8604	124	2014	03	01	17	37	40	260	-23.3058	-45.4089	-18	0	30.54	
8605	124	2014	03	01	17	37	40	310	-23.3174	-45.387	-10	0	30.56	
8606	124	2014	03	01	17	41	46	855	-23.288	-45.4246	-10	0	31.37	
8607	124	2014	03	01	17	42	45	428	-23.3365	-45.3847	-34	0	29.30	
8608	124	2014	03	01	17	44	42	915	-23.3272	-45.3897	-13	0	29.74	
8609	124	2014	03	01	17	44	42	947	-23.3276	-45.3995	-10	0	29.29	
8610	124	2014	03	01	17	44	42	981	-23.3205	-45.3968	-15	0	29.92	
8611	124	2014	03	01	17	44	43	005	-23.3353	-45.3867	-7	0	29.29	
8612	124	2014	03	01	17	45	35	438	-23.6774	-45.4893	-26	0	31.06	
8613	124	2014	03	01	17	45	42	656	-23.332	-45.4041	-38	0	28.79	
8614	124	2014	03	01	17	45	42	692	-23.3293	-45.4275	-24	0	28.18	
8615	124	2014	03	01	17	46	40	930	-23.2873	-45.3841	-32	0	32.85	
8616	124	2014	03	01	17	47	20	390	-23.3343	-45.3723	-8	0	30.06	
8617	124	2014	03	01	17	47	20	465	-23.3388	-45.3915	-11	0	28.83	
8618	124	2014	03	01	17	48	14	748	-23.3462	-45.3531	-8	0	30.30	
8619	124	2014	03	01	17	48	14	840	-23.3273	-45.3654	-16	0	30.90	
8620	124	2014	03	01	17	48	14	927	-23.3481	-45.3512	-34	0	30.29	
8621	124	2014	03	01	17	49	49	465	-23.3254	-45.3595	-51	0	31.35	
8622	124	2014	03	01	17	52	15	851	-23.2821	-45.6617	-15	0	35.90	
8623	124	2014	03	01	17	52	15	932	-23.2783	-45.666	-9	0	36.40	
8624	124	2014	03	01	17	59	31	599	-23.2839	-45.3084	-15	0	37.09	
8625	124	2014	03	01	18	01	24	753	-23.2557	-45.6235	-23	0	35.79	
8626	124	2014	03	01	18	15	15	562	-23.3932	-45.2419	-29	0	35.87	
8627	124	2014	03	01	18	15	15	674	-23.383	-45.2597	-12	0	34.86	
8628	124	2014	03	01	18	15	15	797	-23.3786	-45.2587	-12	0	35.17	

Figura 3 – Planilha mostrando um caso de existência de relâmpagos antecedendo o primeiro ocorrido no interior da área de cobertura da rede (indicado em vermelho), configurando um “Sistema se Aproximando” da área monitorada.

Se não fossem encontradas descargas que aconteceram antes do relâmpago analisado, este seria considerado como de “Convecção Local”. A Figura 4, a seguir, mostra um trecho da planilha com as informações dos relâmpagos, destacando a tempestade 071 como um exemplo de um caso de “Convecção Local”. O primeiro relâmpago produzido pela tempestade já ocorre na área de cobertura da rede e está indicado em vermelho.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M		
1	tempestade	ano	mes	dia	hora	minuto	segundo	nanosegundo	latitude	longitude	corrente	pico	flag	intranuvem	distancia
4137	070	2014	01	16	15	08	30	778	-23.0859	-45.9834	-14	0	32.21		
4138	070	2014	01	16	15	08	31	386	-23.4697	-46.1587	-38	0	39.32		
4139	070	2014	01	16	15	08	31	435	-23.4463	-46.1649	-29	0	37.39		
4140	070	2014	01	16	15	08	31	601	-23.0914	-46.0031	-13	0	30.21		
4141	070	2014	01	16	15	08	37	369	-22.9854	-45.9083	-39	0	39.55		
4142	070	2014	01	16	15	08	42	584	-23.2094	-46.0259	-25	0	31.75		
4143	070	2014	01	16	15	08	54	550	-23.1129	-45.9646	-15	0	34.79		
4144	070	2014	01	16	15	08	54	746	-23.1103	-45.9509	-22	0	36.19		
4145	070	2014	01	16	15	09	12	327	-22.977	-45.8954	-32	0	40.99		
4146															
4147	071	2014	01	17	14	03	15	528	-23.6374	-45.5376	-16	0	8.00		
4148	071	2014	01	17	14	03	08	348	-23.7165	-45.42	-10	0	14.46		
4149	071	2014	01	17	14	05	32	093	-23.677	-45.4951	-18	0	5.64		
4150	071	2014	01	17	14	05	32	154	-23.6808	-45.4729	-17	0	7.95		
4151	071	2014	01	17	14	06	15	156	-23.6856	-45.4475	-22	0	10.70		
4152	071	2014	01	17	14	06	15	182	-23.684	-45.4501	-21	0	10.39		
4153	071	2014	01	17	14	06	15	217	-23.6949	-45.4505	-34	0	10.67		
4154	071	2014	01	17	14	06	15	254	-23.6923	-45.4466	-16	0	10.99		
4155	071	2014	01	17	14	07	04	885	-23.681	-45.4435	-14	0	11.00		
4156	071	2014	01	17	14	08	02	438	-23.7084	-45.5189	-34	0	5.91		
4157	071	2014	01	17	14	09	18	221	-23.6909	-45.4849	-29	0	7.19		
4158	071	2014	01	17	14	13	13	962	-23.6369	-45.69	-13	0	16.95		
4159	071	2014	01	17	14	13	38	936	-23.6065	-45.5057	-19	0	4.29		
4160	071	2014	01	17	14	14	08	226	-23.643	-45.6823	-10	0	16.10		
4161	071	2014	01	17	14	15	15	507	-23.6746	-45.4855	-24	0	6.48		
4162	071	2014	01	17	14	16	01	715	-23.6843	-45.4948	-16	0	6.00		
4163	071	2014	01	17	14	16	42	818	-23.7421	-45.8929	-33	0	40.34		

Figura 4 – Planilha mostrando um caso não existência de relâmpagos antecedendo o primeiro ocorrido no interior da área de cobertura da rede (indicado em vermelho), configurando uma “Convecção Local”.

Foram analisadas 134 tempestades, sendo 43% (58 em 134) do tipo Convecção Local e 57% (76 em 134) do tipo Sistema se Aproximando.

2.2 “Threshold”

A ideia principal desta análise é a de tentar encontrar uma relação entre algum valor de campo elétrico atmosférico pré-estabelecido que os sensores mediram e a ocorrência do relâmpago naquela região.

Para isso, foram feitas tabelas que listassem os casos de dados que ultrapassassem os valores de 0,5 kV/m, 1 kV/m, 1,5 kV/m e 2kV/m, levando em consideração também a distância que os sensores estariam do ponto de impacto do primeiro relâmpago. Para facilitar a visualização deste fator, para cada sensor foi marcado um círculo de raio equivalente a 10 km de distância, para simbolizar a área coberta por um deles, e para cada ponto de incidência da descarga elétrica, foram marcados círculos de raios de 10, 20 e 30 km.

A Figura 5 mostra um caso de localização do ponto de impacto de um primeiro relâmpago ocorrido às 15h42 do dia 03/01/2014 dentro da área de cobertura da rede e os círculos de 10, 20 e 30 km associados a ele.

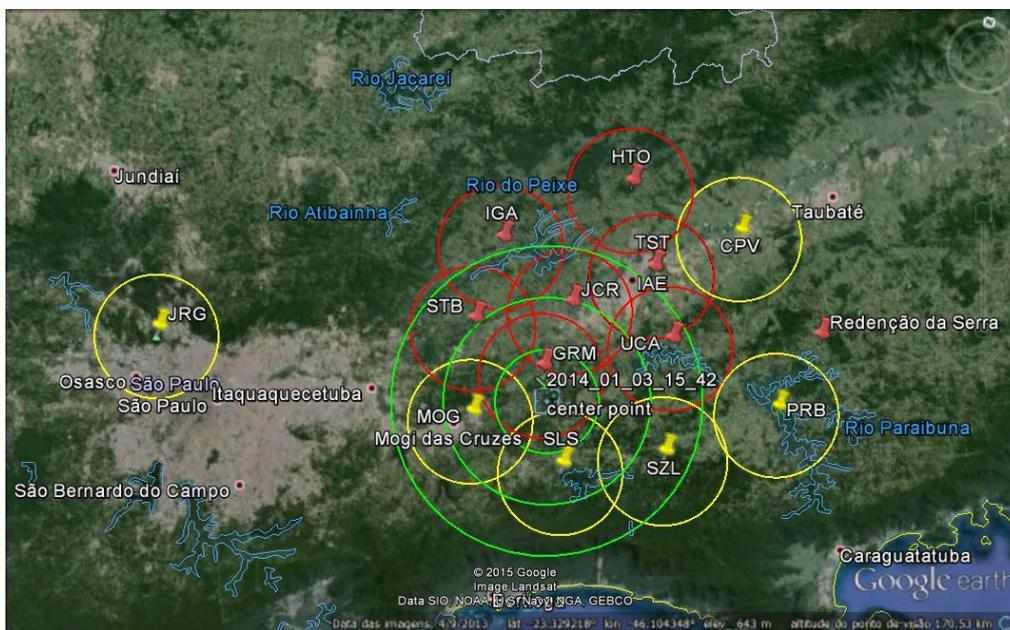


Figura 5 – Localização do ponto de impacto do primeiro relâmpago ocorrido à 15h42 do dia 03/01/2014 e os círculos de 10, 20 e 30 km associados a ele.

Como o fundamento por trás desta metodologia de critério para disparo de alerta se baseia na variação de campo elétrico atmosférico medido pelos sensores, para cada primeiro relâmpago foi criado um gráfico mostrando as curvas desta grandeza, com as informações adquiridas a cada minuto, desde uma hora antes da incidência até uma hora depois. A Figura 6 mostra o gráfico das variações no campo elétrico medido pelos sensores da rede associadas ao

relâmpago ocorrido às 15h42 do dia 03/01/2014 mostrado na figura anterior. A reta vermelha indica o instante da ocorrência do relâmpago.

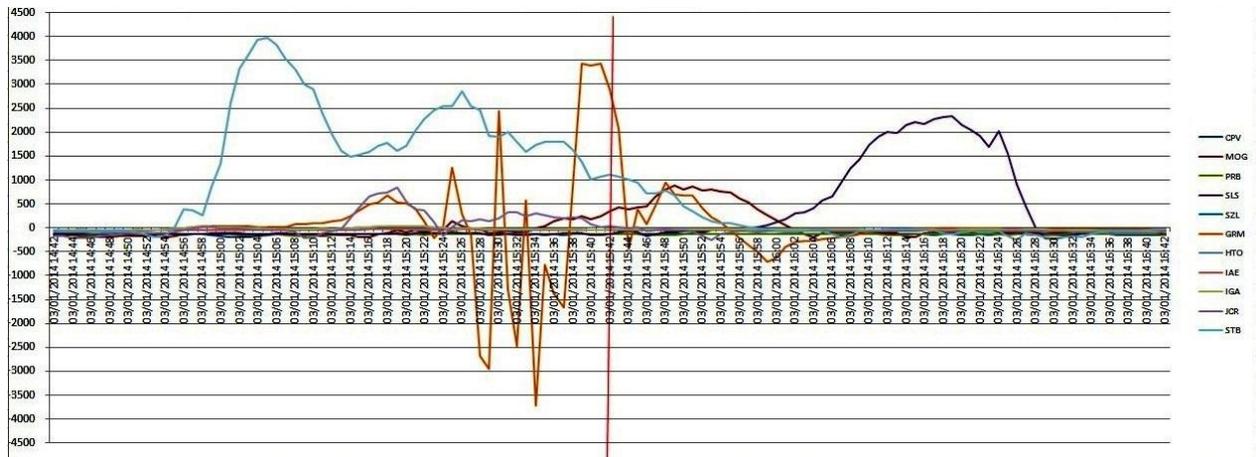


Figura 6 – Variações no campo elétrico atmosférico medido pelos sensores da rede associadas à tempestade que provocou um relâmpago às 15h42 do dia 03/01/2014.

A tabela usada para fazer a análise dos dados através desta metodologia é construída a partir dos gráficos feitos para os primeiros relâmpago das tempestades. Para cada valor de campo elétrico definido como possível critério, foram contados quantos sensores fizeram medidas que o ultrapassaram, e com quanto tempo de antecedência com relação ao instante de ocorrência do relâmpago. A Figura 7, a seguir, mostra um trecho da planilha gerada para o nível crítico de 0,5 kV/m, e as Figuras 8, 9 e 10 mostram trechos das planilhas levantadas para os outros valores de threshold (1;1,5 e 2kV/m).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q		
1	Tempestade	1º Relâmpago					0,5 kV/m												
2		Instante da Ocorrência					0 a 10 km				10 a 20 km		20 a 30 km		> 30 km		Effective Alarm EA	False Alarm FA	Fail to Warning FTW
3		ano	mês	dia	hora	minutos	sensor	min	sensor	min	sensor	min	sensor	min					
4																			
68	85	2014	1	25	21	0			CPV	5				IGA	55	1			
69														STB	37				
70	86	2014	1	26	16	42											1		
71	87	2014	1	26	20	1	IGA	5								1			
72	88	2014	1	28	22	18											1		
73	89	2014	1	28	23	42	HTO	7								1			
74	90	2014	1	29	0	39	JCR (-)	33			STB (-)	35				1			
75										IGA	19								
76	91	2014	2	2	20	41			STB	8			CPV	15	1				
77													IGA	2					
78	92	2014	2	3	21	21							IGA(-)	3	1				
79	93	2014	2	4	0	43							PRB	38	1				
80	94	2014	2	8	18	33							PRB	32	1				
81													STB (-)	48					
82							HTO (-)	35			IGA	60	MOG	56	1				
83	95	2014	2	8	20	1				JCR	14	STB	58						
84													GRM	1					
85													GRM (-)	45	1				
86													STB	37					
87	96	2014	2	8	21	37							JCR (-)	47					
88													IGA	4					
89													MOG	51					
90	97	2014	2	9	23	25											1		
91	98	2014	2	13	8	28							JCR (-)	43	1				
92	99	2014	2	13	16	50							CPV	45	1				
93	100	2014	2	13	22	27											1		

Figura 7 – Trecho da planilha com o levantamento dos sensores que ultrapassaram o nível crítico de 0,5 kV/m em cada faixa de distância.

	A	B	C	D	E	F	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB		
1	Tempestade	1º Relâmpago					1,0 kV/m												
2		Instante da Ocorrência					0 a 10 km				10 a 20 km		20 a 30 km		> 30 km		Effective Alarm EA	False Alarm FA	Fail to Warning FTW
3		ano	mês	dia	hora	minutos	sensor	min	sensor	min	sensor	min	sensor	min					
4																			
68	85	2014	1	25	21	0				CPV	2			IGA	47	1			
69														STB	31				
70	86	2014	1	26	16	42											1		
71	87	2014	1	26	20	1	IGA	2								1			
72	88	2014	1	28	22	18											1		
73	89	2014	1	28	23	42	HTO	4								1			
74	90	2014	1	29	0	39					HTO	60				1			
75																			
76	91	2014	2	2	20	41											1		
77																			
78	92	2014	2	3	21	21							IGA (-)	2	1				
79	93	2014	2	4	0	43											1		
80	94	2014	2	8	18	33							PRB	8	1				
81																			
82							HTO (-)	25								1			
83	95	2014	2	8	20	1					JCR	13	STB	55					
84																			
85													GRM	53	1				
86													STB	41					
87	96	2014	2	8	21	37							JCR (-)	46					
88																			
89																			
90	97	2014	2	9	23	25											1		
91	98	2014	2	13	8	28											1		
92	99	2014	2	13	16	50							CPV	40	1				
93	100	2014	2	13	22	27											1		

Figura 8 – Trecho da planilha com o levantamento dos sensores que ultrapassaram o nível crítico de 1,0 kV/m em cada faixa de distância.

	A	B	C	D	E	F	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM
1	Tempestade	1º Relâmpago					Numero de Sensores Acima do Threshold										
2		Instante da Ocorrência					1,5 kV/m								Effectiv e Alarm EA	False Alarm FA	Fail to Warnin g FTW
3							0 a 10 km		10 a 20 km		20 a 30 km		> 30 km				
4		ano	mês	dia	hora	minutos	sensor	min	sensor	min	sensor	min	sensor	min			
68	85	2014	1	25	21	0			CPV	1				IGA	42	1	
69																	
70	86	2014	1	26	16	42											1
71	87	2014	1	26	20	1											1
72	88	2014	1	28	22	18											1
73	89	2014	1	28	23	42											1
74	90	2014	1	29	0	39					HTO	57			1		
75																	
76	91	2014	2	2	20	41											1
77																	
78	92	2014	2	3	21	21											1
79	93	2014	2	4	0	43											1
80	94	2014	2	8	18	33											1
81																	
82															1		
83	95	2014	2	8	20	1				JCR	13	STB	54				
84																	
85													GRM	53	1		
86													STB	60			
87	96	2014	2	8	21	37							JCR (-)	44			
88																	
89																	
90	97	2014	2	9	23	25											1
91	98	2014	2	13	8	28											1
92	99	2014	2	13	16	50							CPV	37	1		
93	100	2014	2	13	22	27											1

Figura 9 – Trecho da planilha com o levantamento dos sensores que ultrapassaram o nível crítico de 1,5 kV/m em cada faixa de distância.

	A	B	C	D	E	F	AN	AO	AP	AQ	AR	AS	AT	AU	AV	AW	AX
1	Tempestade	1º Relâmpago					Numero de Sensores Acima do Threshold										
2		Instante da Ocorrência					2,0 kV/m								Effectiv e Alarm EA	False Alarm FA	Fail to Warning FTW
3							0 a 10 km		10 a 20 km		20 a 30 km		> 30 km				
4		ano	mês	dia	hora	minutos	sensor	min	sensor	min	sensor	min	sensor	min			
68	85	2014	1	25	21	0											1
69																	
70	86	2014	1	26	16	42											1
71	87	2014	1	26	20	1											1
72	88	2014	1	28	22	18											1
73	89	2014	1	28	23	42											1
74	90	2014	1	29	0	39											1
75																	
76	91	2014	2	2	20	41			STB	3					1		
77																	
78	92	2014	2	3	21	21											1
79	93	2014	2	4	0	43											1
80	94	2014	2	8	18	33											1
81																	
82															1		
83	95	2014	2	8	20	1				JCR	12	STB	52				
84																	
85															1		
86													STB	59			
87	96	2014	2	8	21	37							JCR (-)	43			
88																	
89																	
90	97	2014	2	9	23	25											1
91	98	2014	2	13	8	28											1
92	99	2014	2	13	16	50							CPV	27	1		
93	100	2014	2	13	22	27											1

Figura 10 – Trecho da planilha com o levantamento dos sensores que ultrapassaram o nível crítico de 2,0 kV/m em cada faixa de distância.

3. Resultados

3.1. Análise do conjunto de todas as tempestades

A Tabela 2 abaixo mostra a análise feita para todo o conjunto de 134 tempestades, independente da classificação em convecção local ou sistema se aproximando.

Tabela 2 – Conjunto de 134 tempestades

	0 a 10 km		10 a 20 km		20 a 30 km		> 30 km		Effective Alarm	Fail to Warning	False Alarm
	sensor/temp	min	sensor/temp	min	sensor/temp	min	sensor/temp	min			
0,5 kV/m	0,1	23	0,2	31	0,2	36	1,2	38	70%	30%	
1,0 kV/m	0,1	23	0,1	33	0,1	38	0,8	37	50%	50%	
1,5 kV/m	0,1	24	0,1	33	0,1	35	0,6	37	40%	60%	
2,0 kV/m	0,0	34	0,1	31	0,1	26	0,5	37	30%	70%	

Da análise dos resultados obtidos observa-se que o alerta de risco de tempestade foi efetivo em 70% dos casos (94 de 134 tempestades) para um ajuste do nível crítico de intensidade do campo elétrico atmosférico de 0,5 kV/m. Os resultados também mostram que, restringindo-se o raio da região ao redor do ponto de impacto do relâmpago a menos de 30 km, em média o numero de sensores que ultrapassam o nível crítico de intensidade do campo elétrico para disparo do alerta de risco de relâmpago é menor que 1, variando entre 0 e 0,2 sensor por tempestade. Ou seja, em cerca de 80% dos casos o alerta não seria disparado, pois nenhum sensor atingiria o nível crítico de disparo. Quando a área considerada tem raio maior que 30 km, em média pelo menos 1 sensor (valor encontrado de 1,2 sensor por tempestade) atinge a intensidade de campo para disparo do alerta, caso o nível crítico tenha sido ajustado para 0,5 kV/m. Também nessa configuração é obtido o maior tempo de antecedência no disparo do alerta de 38 minutos.

3.2. Análise das tempestades do tipo “Convecção Local”

A Tabela 3 abaixo mostra a análise das 58 tempestades desenvolvidas diretamente sobre a área coberta pela rede de monitoramento do campo elétrico do Vale do Paraíba, classificadas como de “Convecção Local”.

Tabela 3 – Conjunto de 58 tempestades classificadas como de “Convecção Local”

	0 a 10 km		10 a 20 km		20 a 30 km		> 30 km		Effective Alarm	Fail to Warning	False Alarm
	sensor/temp	min	sensor/temp	min	sensor/temp	min	sensor/temp	min			
0,5 kV/m	0,2	21	0,3	31	0,2	29	0,6	26	70%	30%	
1,0 kV/m	0,1	20	0,2	32	0,1	29	0,3	22	40%	60%	
1,5 kV/m	0,1	23	0,1	30	0,1	28	0,2	16	30%	70%	
2,0 kV/m	0,1	30	0,1	29	0,0	8	0,1	15	20%	80%	

Resultados semelhantes foram encontrados quando se avalia somente os casos de tempestades do tipo “Convecção Local”. Do mesmo modo o alerta de risco de tempestade foi efetivo em 70% dos casos (41 de 58 tempestades) para um ajuste do nível crítico de intensidade do campo elétrico atmosférico de 0,5 kV/m. Com esse ajuste foi obtido um tempo de antecedência no disparo do alerta de 26 minutos. Porém, apesar de ser a melhor média encontrada para todos os ajustes do nível crítico da intensidade de campo analisados, menos de 1 sensor (0,6 sensor por tempestade) atinge o nível de 0,5 kV/m para disparo do alerta.

3.3. Análise das tempestades do tipo “Sistema Aproximando”

A Tabela 4 abaixo mostra a análise das 76 tempestades classificadas como “Sistema se Aproximando”.

Tabela 4 – Conjunto de 76 tempestades classificadas como “Sistema se Aproximando”

	0 a 10 km		10 a 20 km		20 a 30 km		> 30 km		Effective Alarm	Fail to Warning	False Alarm
	sensor/temp	min	sensor/temp	min	sensor/temp	min	sensor/temp	min			
0,5 kV/m	0,1	27	0,2	32	0,3	40	1,8	40	80%	20%	
1,0 kV/m	0,1	26	0,1	33	0,1	43	1,2	40	50%	50%	
1,5 kV/m	0,1	24	0,1	38	0,1	38	1,0	40	50%	50%	
2,0 kV/m	0,0	41	0,1	35	0,1	29	0,7	40	40%	60%	

Para esse tipo de tempestade o nível crítico de disparo do alerta de risco de relâmpago de 0,5 kV/m foi efetivo em 80% dos casos (61 em 76 tempestades), o melhor resultado de todo o trabalho. Também foram obtidos o melhor tempo de antecedência no disparo do alerta (40 minutos) e o maior número médio de sensores que alcançam o nível de disparo (1,8 sensores por tempestade) quando a área considerada tem raio maior que 30 km.

4. Conclusões

Foram analisados os dados de campo elétrico medidos pelos sensores da rede de monitoramento obtidos no período de janeiro a abril de 2014. Esse período foi escolhido por ser o primeiro verão com todos os sensores operando ininterruptamente.

Foi avaliado o critério de disparo de alerta de risco de ocorrência de relâmpago dentro da área de cobertura da rede que tem por base a ultrapassagem de um determinado nível crítico de intensidade do campo elétrico atmosférico. Foram analisados quatro níveis críticos de intensidade de campo para disparo do alerta: 0,5 kV/m; 1,0 kV/m; 1,5 kV/m e 2,0 kV/m.

Os resultados obtidos mostram que o ajuste mais adequado para o nível crítico de intensidade de campo a ser utilizado como referência para o disparo do alerta de risco de relâmpago para a área de cobertura da rede é 0,5 kV/m. Com esse ajuste, para os 134 casos de primeiros relâmpagos que atingiram a área monitorada, 70% foram alertados corretamente e, obviamente, em 30% dos casos o sistema falhou em alertar. O tempo médio de antecedência na emissão do alerta encontrado foi de 38 minutos. Nessa configuração, pelo menos 1 sensor atinge o nível crítico de disparo do alerta quando é considerada uma área com raio superior a 30 km ao redor do ponto de impacto do relâmpago.

A análise feita a partir da separação das tempestades nas que se desenvolvem diretamente sobre a área coberta pela rede de monitoramento (Convecção Local) e nas que se deslocam em direção à área coberta pela rede a partir de outra região (Sistema se Aproximando), mostra que o sistema apresentou um desempenho melhor para as tempestades pertencentes ao segundo tipo. Para as 76 tempestades classificadas como “Sistemas se Aproximando” o sistema alertou corretamente 61 delas, 80% dos casos, com um tempo médio de antecedência de 40 minutos, para o ajuste do nível crítico de intensidade do campo de 0,5 kV/m para o disparo do alerta. Com relação às 58 tempestades classificadas como “Convecção Local” o sistema apresentou um desempenho regular, alertando corretamente 41 delas, 70% dos casos,

com um tempo médio de antecedência de 26 minutos, para o ajuste do nível crítico de intensidade do campo de 0,5 kV/m para o disparo do alerta.

Em relação ao estudo realizado por Ferro (2010) utilizando um único sensor, numa área inserida dentro da área de cobertura avaliada neste estudo, e que apresentou uma eficiência na emissão de alerta de risco de ocorrência de relâmpago de 60%, com tempo de antecedência médio de 13 minutos, a atual rede de monitoramento do campo elétrico atmosférico apresentou um desempenho significativamente melhor, tanto na eficiência como no tempo de antecedência médio de emissão de alertas de risco de relâmpago.

Porem é necessário ressaltar dois pontos que não foram considerados no presente estudo. O primeiro diz respeito à avaliação dos casos de Falsos Alarmes. Todos os casos analisados foram de relâmpagos que efetivamente ocorreram dentro da área de cobertura da rede. Portanto, só foi possível avaliar a taxa de eficiência e de falha em alarmar. Para calcular a taxa de emissão de falsos alarmes, seria preciso buscar no banco de dados todos os casos nos quais um ou mais sensores atingiram o nível crítico de disparo, o alerta foi emitido, mas não houve ocorrência de relâmpagos dentro da área de monitoramento. Como todos os doze sensores fazem uma aquisição a cada minuto, durante 24 horas, todos os dias do ano, o volume de dados a ser pesquisado é muito grande. Não havia tempo hábil até o encerramento deste trabalho para essa avaliação. Porem essa é uma avaliação necessária, pois a taxa de Falsos Alarmes é um critério importante na decisão de qual nível crítico de intensidade de campo deve ser adotado para o disparo do alerta de risco de relâmpago. Uma taxa alta de falsos alertas pode atrapalhar muito, ou mesmo inviabilizar, a execução das atividades para as quais se busca assegurar a proteção com a utilização do sistema de monitoramento.

O segundo ponto diz respeito à área de cobertura da rede de monitoramento. No presente estudo, todos os sensores encontram-se dentro da área de cobertura considerada. Em consequência, a maioria dos primeiros relâmpagos teve seu ponto de impacto ocorrendo próximo aos sensores localizados nas bordas da área de cobertura considerada. A Figura 11, a seguir, mostra um exemplo desses casos.

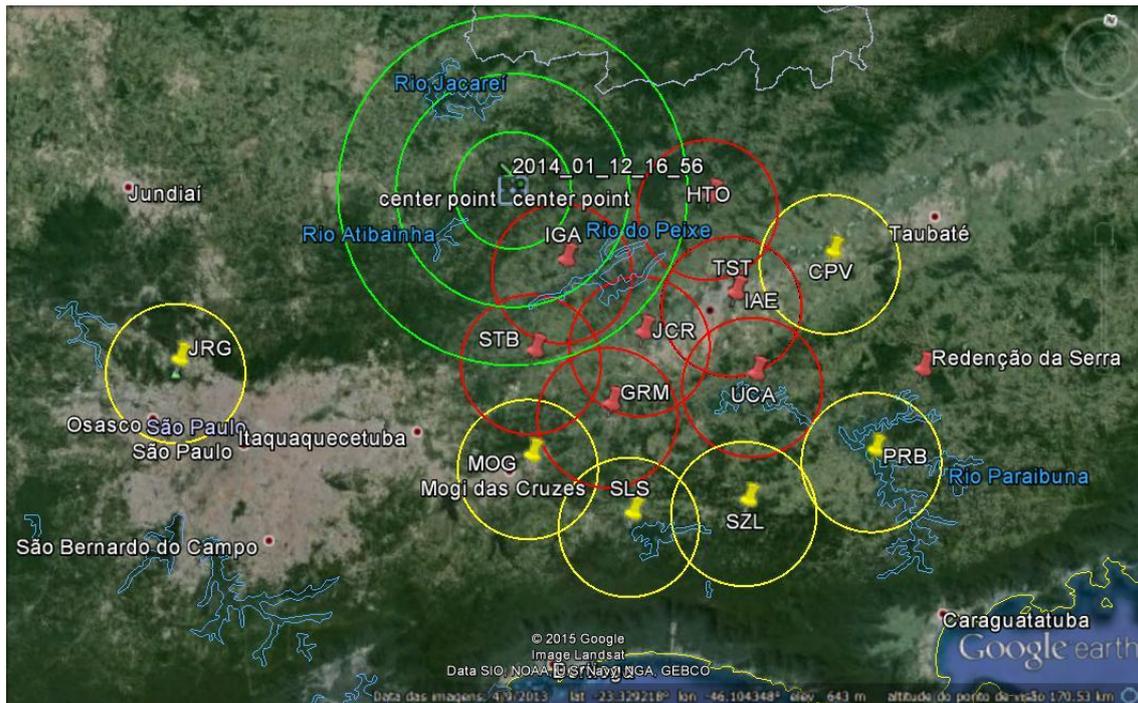


Figura 11 – Exemplo de ponto de impacto do primeiro relâmpago atingindo a borda da área de cobertura da rede de monitoramento.

Nessas situações, a maioria dos sensores encontra-se muito distante do ponto de ocorrência do relâmpago e, provavelmente, do centro de carga da nuvem que deu origem a ele. Em consequência, como a intensidade do campo elétrico atmosférico é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre o ponto de medida e a localização da carga que deu origem a ele, a probabilidade desses sensores não experimentarem uma variação na intensidade de campo suficiente para atingir o nível crítico de disparo do alerta é maior. Isso pode explicar o número médio baixo de sensores por tempestade que atingiram o nível crítico de intensidade de campo para disparo do alerta de risco de ocorrência de relâmpago no presente trabalho. Existem duas propostas que podem levar a uma melhora desse quadro. A primeira, de mais difícil implementação por envolver investimentos, é a ampliação do número de sensores de maneira que a área considerada passe a ficar interna à distribuição dos mesmos. A segunda é simplesmente refazer as análises considerando uma área de cobertura da rede menor, de maneira que ela passe a ficar interna à atual distribuição de sensores. Os dois pontos comentados deverão ser abordados em trabalhos futuros.

Referências

Aranguren, D.; Montanya, J.; Sola, G.; March, V.; Romero, D.; Torres, H. On the lightning hazard warning using electrostatic field: Analysis of summer thunderstorms in Spain. **Atmospheric Research**, (2009) doi:10.1016/j.elstat.2009.01.023.

Beasley, W.H.; Williams, D.E.; Hyland, P.T. “Analysis of surface electric-field contours in relation to cloud-to-ground lightning flashes in air-mass thunderstorms at the Kennedy Space Center”. 20th International Lightning Detection Conference (ILDC). **Proceedings**. Tucson, 2008.

Ferro, M. A. S.; Saba, M. M. F.; Naccarato, K. P.; Yamasaki, J.; Pimentel, D. R. M. “Cloud-to-ground lightning warnings based on electric field-mill measurements in Brazil”. International Conference on Lightning Protection (ICLP). **Proceedings**. Cagliari, Italy, 2010.

Holle, R.L.; Lopez, L.J.; Ortiz, R.; Watson, A.I.; Smith, D.L.; Decker, D.M.; Paxton, C.H. “Cloud-to-ground lightning related to deaths, injuries, and property damage in Central Florida”. International Aerospace and Ground Conference on Lightning and Static Electricity. **Proceedings**. Atlantic City, 1992.

Holle, R.L.; Murphy, M.J.; Lopez, R.E. “Distances and times between cloud-to-ground flashes in a storm”. International Conference on Lightning and Static Electricity (ICLSE). **Proceedings**. Blackpool, 2003.

Lengyel, M.M., "Lightning casualties and their proximity to surrounding cloud-to-ground lightning". *M.S. Thesis*. University of Oklahoma, 2004

Montanya, J.; Aranguren, D.; Pineda, N.; Sola, G.; Romero, D.; March, V. “Total lightning, electrostatic field and meteorological radar applied to lightning hazard warning” . 20th International Lightning Detection Conference (ILDC). **Proceedings**. Tucson, CD-ROM, 2008.

Murphy, M.J.; Cummins, K.L. “Early detection and warning of cloud-to-ground lightning at a point of interest”. 2nd Symposium on Environmental Applications. **Proceedings**. American Meteorological Society, Long Beach, 172-177, 2000.

Murphy, M.J., Demetriades, N.W.S., Cummins, K.L., 2002, “Probabilistic early warning of cloud-to-ground lightning at an airport. 16th Conference on Probability and Statistics in the Atmospheric Sciences”. **Proceedings**. American Meteorological Society, Orlando, p. 126-131.

Murphy, M.J.; Holle, R.L. “A warning method for the risk of cloud-to-ground lightning based on total lightning and radar information”. International Conference on Lightning and Static Electricity (ICLSE). **Proceedings**. The Boeing Co., Seattle, 2005.

Murphy, M.J.; Holle, R.L. “Warnings of cloud-to-ground lightning hazard based on combinations of lightning detection and radar information”. 19th International Lightning Detection Conference (ILDC). **Proceedings**. Tucson, CD-ROM, 2006.

Murphy, M.J.; Holle, R.L.; Demetriades, N.W.S. “Cloud-to-ground lightning warnings using electric field mill and lightning observations”. 20th International Lightning Detection Conference (ILDC). **Proceedings**. Tucson,, 2008.

Naccarato, K.P.; Pinto Jr., O.; Ferreira Jr., H.H. “Cloud-to-ground lightning forecast based on lightning location system information and electric field-mill data”. International Conference on Grounding and Earthing (GROUND'2008) & 3th International Conference on Lightning Physics and Effects (LPE). **Proceedings**. Florianópolis, Brazil, 2008.