



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Programa de Doctorado en Ingeniería Eléctrica

Localizaciones con impactos de rayos recurrentes.

Aportación a la distribución geográfica de rayos con corrientes extremas y
a la caracterización de rayos que afectan aerogeneradores.

Tesis doctoral realizada por:

Glòria Solà de las Fuentes

Dirigida por:

Joan Montanyà Puig

Jesús Alberto López Trujillo

Departamento de Ingeniería Eléctrica

Terrassa, agosto 2023

Resumen

En la actualidad, las descargas eléctricas atmosféricas (rayos) presentan un desafío para el buen funcionamiento de un sistema eléctrico cada vez más complejo. Uno de los elementos más sensibles y expuestos a los rayos son los aerogeneradores. Estos, aparte de ser objeto del impacto directo del rayo, también pueden iniciar rayos ascendentes, ya que por su altura y por la elevación del terreno donde normalmente se ubican, están expuestos a fuertes campos eléctricos locales bajo las nubes de tormenta. El conocimiento actual sobre el rayo no permite la comprensión suficiente para asegurar una completa prevención y protección.

El objetivo principal de la tesis es la caracterización de la actividad de rayos para aplicaciones de ingeniería como aerogeneradores y, en general, estructuras elevadas.

La tesis se basa en las detecciones de rayos del sistema de localización de rayos LINET. Este sistema fue instalado y operado en el marco de la tesis. Además, la tesis desarrolla una herramienta de cálculo de la eficiencia de detección para la evaluación de sistemas de detección de rayos nube-tierra. Esta herramienta se basa en los trabajos previos de CIGRE TF C4.404A permitiendo al usuario la evaluación de la calidad de los datos.

La tesis introduce un nuevo concepto: las localizaciones con impactos de rayo recurrentes (RLS), que son ubicaciones que se ven afectadas repetidamente por rayos de nube a tierra cada año consecutivo durante varios años, utilizando solo datos de los sistemas de localización de rayos. La evaluación del concepto RLS se centra en dos zonas de estudio con distinta actividad de rayos, pero orografía similar: una es Cataluña (España, Europa) y la otra en Barrancabermeja (Colombia, América del Sur), en el trópico. Los RLS que se encuentran están relacionados con estructuras altas, picos de montañas y terrenos escarpados. El método permite identificar aquellas torres de gran altura y relieve orográfico frecuentemente afectados por rayos, que no se detectan con el mero cómputo de la densidad de rayos. Además del interés científico por entender mejor el comportamiento de los rayos, el nuevo concepto de RLS proporciona nueva información valiosa directamente aplicable a la ingeniería de protección contra rayos.

Por otro lado, en la tesis se ha investigado qué distribución geográfica presentan las corrientes más extremas de rayos, a partir del análisis de corrientes de datos de sistemas de localización de rayos en un área que incluye la región de Cataluña y parte del mar Mediterráneo. En los resultados se observa que las zonas con más actividad de rayos de corriente extrema son el mar y las zonas

de alta montaña como Pirineos y Prepirineos. Según la polaridad se distribuyen de forma diferenciada, especialmente los meses de más actividad de rayos (de abril a octubre). Las zonas de intensidades extremas son interesantes como información para mejorar los estándares de protección frente al rayo.

A partir de información real de incidencias de rayos en aerogeneradores que sucedieron en España entre 2007 y 2022, la tesis analiza las características de los rayos detectados por un sistema de detección de rayos. Este enfoque es novedoso en la literatura científica y confirma la utilidad de datos de rayos precisos para evaluar si han ocasionado daños en aerogeneradores. Se verifica que pueden suceder durante todo el año, pero especialmente fuera de la temporada de más rayos. En la mayoría de casos se detectan rayos a las inmediaciones del aerogenerador, en los tres días anteriores a la fecha indicada y de intensidades relativamente bajas. Se proponen criterios para clasificar si la incidencia ocurrió en condiciones de rayos de invierno, caracterizados a menudo con bajas corrientes de pico o que no se llegan a detectar, pero que pueden llegar a ser muy energéticos.

Abstract

Nowadays, lightning presents a challenge to the proper functioning of an increasingly complex electrical system. One of the most sensitive and exposed to lightning elements are wind turbines. Due to their height and typical elevated location, they can also initiate upward lightning flashes. Current knowledge about lightning still needs more understanding to ensure complete prevention and protection.

The main objective of the thesis is the characterization of lightning activity for engineering applications for wind turbines and, in general, elevated structures.

The thesis uses the lightning detections of the LINET lightning location system as the data source. This system was installed and operated within the framework of this thesis. In addition, the thesis develops a detection efficiency calculation tool for evaluating cloud-to-ground lightning detection systems. This tool builds on the previous work of CIGRE TF C4.404A to assess the quality of lightning data.

The thesis introduces a new concept: recurrent lightning spots (RLS), which are locations repeatedly struck by cloud-to-ground lightning each consecutive year for several years, using only data from lightning location systems. It focuses on two study areas with different lightning activity but similar orography: one is Catalonia (Spain, Europe), and the other is Barrancabermeja (Colombia, South America), in the tropics. The RLS found are associated with tall structures, mountain peaks, and steep terrain. The method allows the identification of sites with tall towers and orographic relief frequently affected by lightning, which are not detected with the mere computation of the lightning density. In addition to the scientific interest to better understand lightning behavior, the new RLS concept provides valuable new information directly applicable to lightning protection engineering.

On the other hand, the thesis has investigated the geographical distribution of the most extreme lightning currents in an area that includes the region of Catalonia and part of the Mediterranean Sea. Results show that the areas with the most extreme lightning peak currents are over sea and high mountain areas, such as the Pyrenees and Pre-Pyrenees. Depending on the polarity, they are distributed differently, especially in the months with the highest lightning activity (from April to October). Identifying these zones is interesting as information to improve lightning protection standards.

Based on information on lightning incidents in wind turbines that occurred in Spain between 2007 and 2022, the thesis focuses on the characteristics of lightning located by a lightning detection system. This approach is novel in the scientific literature and confirms the usefulness of accurate lightning data to assess whether lightning has caused damage to wind turbines. Results show that

incidents can happen throughout the year, but especially outside the season of more lightning. In most cases, lightning is detected near the wind turbine within three days before the date indicated and with relatively low intensities. Some criteria are proposed to classify if the incidence occurred in winter lightning conditions, often characterized by low stroke peak current or not being detected, but they can be very energetic.

Vull agrair sincerament...

Als meus tutors de tesis, Joan i Jesús, per acompanyar-me en aquest camí amb paciència, dedicació i bons consells. Han estat uns grans mestres.

A l'Àngel Illa i a la Sílvia Alés de *Ingesco*, juntament amb el Joan, perquè van confiar en mi per iniciar la instal·lació de LINET a Espanya. M'han mostrat el seu ferm compromís en el projecte i aconsellat en totes les circumstàncies durant aquests 17 anys des de que va començar l'aventura de *Fulgura*. A ells i també a la resta de socis de *Fulgura* per donar-me l'oportunitat de fer aquesta tesis.

Al Professor Hans Dieter Betz i al seu equip de *nowcast GmbH*, en especial a l'Andi Besner, que em van introduir en el món de la detecció de llamps de LINET. Vaig aprendre molt en les meves estades a Munic. Junts vam fer una molt bona col·laboració, reflectida en el capítol del treball experimental d'aquesta tesis.

Als pèrits, tècnics d'empreses eòliques, en especial al Víctor March, de *Siemens Gamesa*, i altres participants de projectes de *Fulgura*, que tots els seus problemes amb els llamps han estat un repte i m'han fet aprendre moltíssim. Els estudis d'eficiència de detecció dels sistemes de localització de llamps i els dels casos d'aerogeneradors que s'inclouen en aquesta tesis han sortit a partir d'alguns d'aquests treballs.

Al Nicolau Pineda del *Sevei Meteorològic de Catalunya* i l'Earle Williams del *Massachusetts Institute of Technology* (Boston, EEUU), per tota la col·laboració i les aportacions tan valuoses en els treballs dels *Recurrent Lightning Spots* i de la Situació Geogràfica de les Corrents Extremes, que formen part d'aquesta tesis.

Als companys del *Lightning Reserach Group* de la *UPC* que sempre m'han ajudat quan els ho he demanat, especialment l'Òscar van der Velde, el David Romero i l'Albert Salvador.

Al Professor Farhad Rachidi, que em va introduir en el camp de recerca dels llamps i em va acollir amb gran hospitalitat al *Laboratoire EMC* de la *EPFL* (Suïssa). Per mi és tot un referent.

A qui dec també moltes ensenyances d'aquest món dels llamps i també personals, i representa un altre gran referent és el Professor Blas Hermoso de la *Universidad Pública de Navarra*.

Als meus amics de la universitat Mar, Irene, Anna, Gerard i Ivan, que em van iniciar en el treball en equip, en què units tot ho podem, i que per mi té un gran valor el seu suport incondicional.

A les meves amigues Mar, Núria, Mariona, Montse, Glòria, Judit, Marlén i Natàlia, que en totes les circumstàncies m'han animat i han estat amb mi quan les he necessitat.

A tota la meva família de Terrassa i de Súria, en especial als meus pares que m'han empès sempre a estudiar i aprendre i, per poder fer-ho, m'han facilitat molt el camí. Aquest cop amb la tesis, els hi ha tocat fer d'avis, i a la meva germana Cristina, de tieta, més sovint.

Als meus fills Quim, Pol i Jan, la llum i alegria de la meva vida. Han viscut aquest doctorat des de que van néixer.

Al Joan, amb qui la vida al seu costat és molt més bonica. La passió pels llamps en forma part.

Al Pare, pel seu Amor Incondicional.

Índice

1	Introducción.....	1
1.1	Objetivos.....	4
1.2	Estructura de la tesis	4
2	Estado del arte	7
2.1	El rayo: formación, tipología y parámetros	7
2.1.1	Nubes de tormenta	7
2.1.2	Tipos de descargas de rayos	8
2.1.3	Mecanismo de un rayo a tierra	10
2.1.4	Campos eléctricos y electromagnéticos que genera un rayo	11
2.1.5	Corriente y otros parámetros del rayo	15
2.2	Sistemas de localización de rayos (LLS).....	18
2.2.1	Detección electromagnética de rayos	19
2.2.2	Otros sistemas.....	22
2.2.3	Variables derivadas de los sistemas LLS: número y agrupación de descargas	22
2.2.4	Corriente de pico a partir del campo electromagnético	23
2.2.5	Densidad de rayos.....	24
2.3	Rayos en estructuras elevadas	25
2.3.1	Influencia estacionalidad: rayos de invierno	27
2.3.2	Características de los rayos en estructuras elevadas.....	29
2.4	Megaflashes y superbolts.....	31
3	Trabajo experimental: instalación y mantenimiento Red LINET en España y Portugal.....	33
3.1	Red de detección de rayos LINET.....	33
3.1.1	Origen	33
3.1.2	Diseño de la Red LINET y principio de detección	34
3.2	Instalación en España y Portugal.....	39
3.2.1	Ubicación y montaje de sensores.....	39
3.2.2	Base de datos	40

3.2.3	Mantenimiento de sensores	41
3.3	Conclusiones y contribuciones en artículos publicados	41
4	Eficiencia de detección de los sistemas de detección de rayos (LLS).....	43
4.1	Introducción.....	43
4.2	Parámetros de un LLS	44
4.2.1	Corriente de pico	44
4.2.2	Velocidad de la descarga de retorno (RS)	44
4.2.3	Propagación del campo electromagnético	45
4.2.4	Umbral de detección del sensor.....	45
4.2.5	Técnica de detección y banda de frecuencia.....	46
4.2.6	Número de sensores implicados en la detección	46
4.2.7	Geometría de la red.....	46
4.2.8	Clasificación o discriminación	46
4.3	Métodos para evaluar la incertidumbre de un LLS	47
4.3.1	Método directo.....	47
4.3.2	Método gráfico de distribución de corriente.....	50
4.4	Resultados y discusión	52
4.5	Conclusiones y contribuciones en artículos publicados	54
5	Recurrent lightning spots.....	55
5.1	Key Points:	57
5.2	Abstract.....	57
5.3	Introduction	58
5.4	Motivation, data, and methodology	59
5.4.1	Motivation and the Concept of Recurrent Lightning Spot	59
5.4.2	Data.....	59
5.4.3	Methodology.....	60
5.4.4	Case study.....	60
5.5	Results	61
5.6	Discussion.....	66

5.6.1	RLS and ground lightning flash density	66
5.6.2	Type of lightning at RLS	66
5.6.3	RLS-relate orography	67
5.6.4	RLS-relate offshore	68
5.7	Conclusions	69
5.8	Supporting Information from manuscript submitted to Journal of Geophysical Research: Atmospheres	71
6	Caracterización de rayos que afectan aerogeneradores	81
6.1	Introducción.....	81
6.2	Datos y metodología.....	83
6.3	Resultados y discusión	84
6.4	Conclusiones.....	93
7	Corrientes extremas del rayo según situación geográfica.....	95
7.1	Introducción.....	95
7.2	Datos y metodología.....	96
7.3	Resultados y discusión	98
7.4	Conclusiones.....	106
8	Conclusiones finales.....	109
8.1	Trabajo futuro.....	113
9	Bibliografía.....	115
	Annexo I: Procedimiento para el cálculo de la DE.....	129

Índice de Figuras

Figura 1. Aerogenerador impactado por un rayo cerca de Brieke (Alemania), en julio de 2009. (Adaptado de Better Plan, 2023).....	1
Figura 2. Climatología de rayos totales de muy alta resolución horizontal (0.1°) de 16 años (1998–2013) de observaciones de rayos totales TRMM LIS, Número de flahes por km^2 por año (Flash Rate Density, FRD) ($\text{fl km}^{-2} \text{ año}^{-1}$). Adaptado de Albrecht et al. (2018).....	2
Figura 3. Estructura de carga eléctrica tripolar de la nube. (Adaptado de Williams, 2003).....	8
Figura 4. Alturas típicas de las distribuciones de carga eléctrica en diferentes regiones: tormentas de verano en Florida y Nuevo México, y en tormentas invernales en Japón. (Adaptado de Krehbiel, 1986).....	8
Figura 5. Distintos tipos de descargas eléctricas que se producen en las tormentas en la atmósfera de la tierra (Rakov, 2007, imagen elaborada por D. Setman a partir de Lyons et al., 2000).....	9
Figura 6. Tipos de rayos en las nubes: a) Intra-nube; b) Nube-nube y c) Nube-aire. d) Descarga nube-tierra. (Adaptado de Rakov and Uman, 2003).	9
Figura 7. Tipos de rayo según carga efectiva transferida: a) Rayo negativo descendente; b) Rayo positivo ascendente; c) Rayo positivo descendente; d) Rayo negativo ascendente. (Adaptado de Rakov y Uman, 2003).	10
Figura 8. Esquema del proceso de descarga de un CG negativo. (Uman, 2013).....	11
Figura 9. Ilustración del circuito global eléctrico. (Rakov, 2013).....	12
Figura 10. a) Intensidad típica del campo eléctrico (columna de la izquierda) y densidad de flujo magnético (columna de la derecha) para la primera (línea continua) y las siguientes (línea de puntos) RS a distancias de 1, 2 y 5 km. Se identifican los siguientes rasgos característicos de las formas de onda: para campo eléctrico, pico inicial, tiempo de inicio de rampa, rampa y valor $170 \mu\text{s}$; para campo magnético, pico inicial, máximo y valor medio. b) Campos típicos como se describe en la figura la para distancias de 10, 15, 50 y 200 km. Las características de forma de onda características identificadas, además de las anotadas en las gráficas inferiores, son el paso por cero de campos eléctricos y magnéticos. (Adaptado de Lin et al., 1979).....	13
Figura 11. Diagrama de los cambios de campo eléctrico típico de la descarga de nubes. Las trazas superior e inferior son registradas simultáneamente por antenas rápidas y lentas, respectivamente. (Adaptado de Kitagawa y Brook 1960).....	15
Figura 12. Gráfico de campo eléctrico para rayo IC del día 231 en 1991 en el Centro Espacial Kennedy, Florida. (Adaptado de Villanueva et al., 1994).....	15
Figura 13. Distribuciones estadísticas acumulativas de las corrientes máximas de los rayos, que dan el porcentaje de casos que superan el valor de abscisas, a partir de mediciones directas en Suiza. (Adaptado de Bazelyan et al., 1978).	16

Figura 14. Porcentajes de que la I_{max} sea inferior al valor indicado. (El 2% de las primeras descargas de retorno negativas presentan intensidades de corrientes inferiores que 4 kA), adoptados por IEEE y CIGRE y se utiliza en varios estándares de protección contra rayos. (Adaptado de CIGRE 63, 1991).	17
Figura 15. Técnicas de detección de rayos y frecuencias de operación (Cummins y Murphy, 2009).	20
Figura 16. Determinación de la ubicación del impacto del rayo: a) con dos estaciones de antenas circulares (DF); b) con tres estaciones de antenas circulares (DF). (Adaptado de Rakov y Uman, 2003)	20
Figura 17. Localización de la caída del rayo con tres sensores de TOA. (Adaptado de Rubinstein, 2007)	21
Figura 18. Rayo CG con múltiples ramificaciones y un contacto a tierra. (Adaptado de Lightning Research Group, UPC).....	23
Figura 19. Distribución del número medio de rayos anual de LIS/OTD con cuadrícula de 10 km. A la izda. Y debajo del mapa, la media (lila) y máxima (azul) para cada latitud (a) y longitud(c). (Adaptado de Peterson et al., 2021).	25
Figura 20. Torres instrumentalizadas para medida de rayos. a) Niu de l'Àliga, Alp (España) (LRG, UPC). b) Torre CN, Toronto (Canada). (© Philip Oldfield).....	26
Figura 21. Estructura de las nubes en verano e invierno en torre elevada. (Montanya et al., 2007)	28
Figura 22. Mapa de distribución global de rayos de invierno ($\text{strokes} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{year}^{-1}$) para el periodo 2009-2013 (mapa superior). Mapa de la media de días de tormentas por año en el mismo periodo (mapa inferior). (Montanya et al., 2016).	28
Figura 23. Medida de un rayo ascendente iniciado por una torre elevada. ICC son las corrientes continuas iniciales con 3 pulsos superpuestos ICC, un periodo sin flujo de corriente y dos descargas de retorno (RS). (Adaptado de Diendorfer et al., 2019).	29
Figura 24. Forma de onda de la corriente de una RS después de la fase ICC en un rayo ascendente positivo. (Adaptado de Aldis, 2023).	30
Figura 25. Corrientes de pico de ENTLN para 18 casos de flashes encontrados con WWLLN coincidentes con los superbolts, todos ellos en EE. UU. (Adaptado de Holzworth et al., 2019).	31
Figura 26. Mapa de Superbolts detectados en Europa (círculos grises) detectados por WWLLN entre 2012 y 2018, entre los que destacan los medidos por Van Allen Probes en los modos de survey (círculos negros) y de burst (círculos rosas). Superbolts WWLLN vistos en coincidencia (círculos azules), ECLAIR (círculos rojos) mediciones terrestres de ECLAIR y Météorage. (círculos rosas grandes) Observaciones sincronizadas desde el espacio y la tierra con WWLLN, sondas Van Allen y ECLAIR. El círculo rojo discontinuo define un radio de 1500 km centrado en el triángulo negro que indica la ubicación de una de las estaciones ECLAIR utilizadas aquí. Los ejes x e y son la longitud y la latitud, respectivamente. (Adaptado de Ripoll et al., 2021).	32
Figura 27. Sensores de la Red Linet en Europa en 2012. (Adaptada de Keraunos, 2016).	33
Figura 28. Esquema de la configuración del sistema de medición de un sensor LINET. (Adaptado de Schmidt, 2007).....	34
Figura 29. Principio de reconocimiento de rayos IC de LINET. Las señales IC y CG de la misma localización 2D llegan con un tiempo de diferencia. (Adaptado de Betz et al., 2009b)	38

Figura 30. Ejemplo de la precisión de LINET en rayos localizados en dos torres. (Adaptado de Betz et al., 2009b).....	39
Figura 31. Esquema de disposición y requisitos de instalación de un sensor LINET. (Incluye elementos adaptados de nowcast,2023).....	40
Figura 32. Instalación de sensores LINET.	40
Figura 33. Descargas de rayo (strokes) anuales detectados por LINET en la Península Ibérica.....	41
Figura 34. Distribución acumulada de corrientes de la red NLDN en la misma región de EE. UU. para 4 condiciones diferentes de DE. (Adaptado de CIGRE TF C4.404A, 2009).	50
Figura 35. Ejemplo de ajuste de las curvas de distribución acumulada de las corrientes. a) Sin ajustar. b) Corregidas: curvas ya ajustadas. (Adaptado de CIGRE TF C4.404A, 2009).....	51
Figura 36. Esquema del método de ajuste de distribución de corrientes pico de un LLS.	51
Figura 37. Curva de distribución de corriente de pico de LINET, ajustada con la de referencia con la herramienta elaborada.	53
Figura 38. Curva de distribución de corriente de pico de LINET excluyendo valores <10 kA, ajustada con la de referencia con la herramienta elaborada	53
Figura 39. Rotura de palas por rayo en aerogenerador. (Adaptado de Montanyà et al., 2014).	82
Figura 40. Altura efectiva (H) de una turbina. (Adaptado de IEC 61400-24).	83
Figura 41. Distancia a la que se ha detectado el rayo respecto el aerogenerador.	85
Figura 42. Días que han pasado entre el evento y la detección de la incidencia en la turbina	85
Figura 43. Altura efectiva de las turbinas.....	86
Figura 44. Ubicación parques eólicos en España en Google Earth Maps a partir de datos del portal web La GIStería (2023).	87
Figura 45.a) Elevación del terreno de los Parques Eólicos de España. b) Elevación del terreno de las turbinas afectadas por rayos.	87
Figura 46. Valores de amplitud de corriente de los rayos cercanos a las turbinas (kA).	88
Figura 47. Distancia del rayo a la turbina según la amplitud de corriente (valor absoluto). a) Eje horizontal de 0 a 40 km. b) Gráfico a) ampliando zona más próxima al aerogenerador (0 a 3km).	88
Figura 48. Altura efectiva de la turbina según la amplitud de corriente (valor absoluto).	89
Figura 49. Caso de rayos (símbolo redondo rojo) aislados cerca aerogeneradores en periodo de noviembre a marzo.	90
Figura 50. Distribución mensual de los casos de rayos en aerogeneradores, separados por rayos de invierno (azul) y rayos asociados a tormentas de fuerte convección (naranja), propia de la época cálida en el hemisferio Norte.....	90
Figura 51. Situación en el mapa de España de: a) los casos con rayos de invierno y b) los casos con rayos asociados a tormentas de fuerte convección. Estos datos corresponden únicamente a la información de rayos, por confidencialidad no corresponden a los casos de las incidencias.....	91

Figura 52. Variación estacional de rayos de invierno (2009-2013). Valores medios de descargas de rayos (strokes) para los 5 años dividido por el área de la celda. (Adaptado de Montanyà et al., 2016).	91
Figura 53. Distancia del rayo más cercano al aerogenerador afectado: a) en casos de rayos de invierno; b) en casos de rayos asociados a tormentas de fuerte convección.....	92
Figura 54. Amplitud de corriente de los rayos (izda.) y polaridad (dcha.): a) en casos de rayos de invierno; b) en casos de rayos asociados a tormentas de fuerte convección.	92
Figura 55. Densidad de rayos negativos y positivos de corriente extrema (5%). a) Periodo de abril a septiembre (temporada cálida). b) Periodo de octubre a marzo (temporada fría). (Adaptado de Montanyà et. al, 2011).	96
Figura 56. Mapa de elevación de la región de Cataluña.	97
Figura 57. Densidad Rayos a Tierra - GFD para intensidades de corrientes negativas mayores al percentil 90 ($kA \leq -18.11$ kA) – Área de 10 km x10 km - Periodo 2011-2020.	98
Figura 58. Densidad Rayos a Tierra - GFD para intensidades de corrientes positivas mayores al percentil 90 ($kA \geq 22.14$). Área de 10 km x10 km - Periodo 2011-2020.	98
Figura 59. Mapa de la relación entre rayos extremos positivos entre rayos extremos negativos, a partir de la división entre la GFD normalizada para flashes positivos entre la GFD normalizada para flashes negativos (ecuaciones 9 y 10). Las celdas de color naranja tienen más rayos extremos negativos y las lilas más de positivos, mientras que las blancas se equipara la proporción de los rayos extremos negativos con los positivos. Área de 10 km x10 km - Periodo 2011-2020.	99
Figura 60. Densidad Rayos a Tierra (GFD) Área de 10 km x10 km - Periodo 2011-2020: izda. para intensidades de corrientes negativas mayores al percentil 90 ($kA \leq -18.11$ kA); dcha. para intensidades de corrientes positivas mayores al percentil 90 ($kA \geq 22.14$).....	100
Figura 61. Densidad mes a mes de Rayos a Tierra (GFD) Área de 10 km x10 km - Periodo 2011-2020: izda. para intensidades de corrientes negativas mayores al percentil 90 ($kA \leq -18.11$ kA); dcha. para intensidades de corrientes positivas mayores al percentil 90 ($kA \geq 22.14$).	103
Figura 62. Número de días anuales con rayos extremos (Área de 10 km x10 km - Periodo 2011-2020): izda. para intensidades de corrientes negativas mayores al percentil 90 ($kA \leq -18.11$ kA); dcha. para intensidades de corrientes positivas mayores al percentil 90 ($kA \geq 22.14$).	103
Figura 63. Densidad Rayos a Tierra - GFD intensidades de corrientes positivas. Área de 10 km x10 km - Periodo 2011-2020.	105
Figura 64. Curva escalada de la distribución corrientes negativas para ajustar con la curva de referencia. .	106
Figura 65. Ejemplo del histograma de corrientes de pico.	131
Figura 66. Ejemplo de ajuste de curva de corrientes.	132
Figura 67. Ejemplo de curvas experimental y de referencia preparadas para ajustar.....	133
Figura 68. Ajuste de curvas.	135
Figura 69. Ejemplo de encontrar la DE a partir del gráfico.....	135
Figure 5-1. a) Map from the GFD in Catalonia (20 km grid) with LINET data 2011-2020. b) Map from the GFD in Barrancabermeja (20 km grid) with LINET data 2012-2020.....	59

Figure 5-2. Map of RLS locations (diamond symbols) in the studied region centered in Catalonia (Spain). Dataset years 2011-2020. Some RLSs that are communication towers (CT) and a wind turbine (WT) are indicated.....	61
Figure 5-3. Slope classes distribution of the terrain in Catalonia (Spain) and in RLS. In parenthesis percentage of slope gradient.....	62
Figure 5-4. Map of RLS locations (diamond symbols) in the region Barrancabermeja (Colombia, South America), obtained with the condition of lightning each year in the cell of 200 m x200 m and the current near the third quartile higher than or equal than 30 kA. Dataset years 2012-2020.....	64
Figure 5-5. Slope classes distribution of the terrain in Barrancabermeja (Colombia) and in RLS. In parenthesis percentage of slope gradient.....	64
Figure 5-6. RLS located in the steepest terrain in Cerro de armas (1830 m. coords. 6.3301°-73.844°).....	65
Figure 5-7. Height from RLS from Catalonia (Spain) and Barrancabermeja (Colombia) in boxplots.....	65
Figure 5-8. Distribution of GDF in all the region (all the cells) and the RLS. a. From Catalonia. b. From Barrancabermeja.....	66
Figure 5-S1. Elevation maps with RLS (black dots) in: a) Catalonia, b) Barrancabermeja. Both regions have similar altitudes and zones of valley and mountains. GFD grid 3 km x 3 km.....	72
Figure 5-S2. a) Map from the GFD in Catalonia (3 km grid) with LINET data 2011-2020. b) Map from the GFD in Barrancabermeja (Colombia) (3 km grid) with LINET data 2012-2020.....	73
Figure 5-S3. Annual average ground stroke density (strokes·km ⁻² ·yr ⁻¹) with different area sizes (from 0.1-2 km) in three RLS in the Catalonia (Spain) region. Arrow indicates the zone where stroke density is the same from the region around when area size is higher than ~1 km.....	73
Figure 5-S4. Annual average ground stroke density (strokes·km ⁻² ·yr ⁻¹) with different area sizes (from 0.1-6 km) in a RLS in the Barrancabermeja (Colombia)region. Arrow indicates the zone where stroke density is the same from the region around when area size is higher than ~1 km.....	73
Figure 5-S5. Percentage of cases with at least 1 RLS depending on grid size when the lightning is struck by random chance.....	74
Figure 5-S6. a) Some RLS in Catalonia. b) 1-Pic de l'Orri antennas (1436 m, coords. 42.408, 1.215). c) 2- Pic du Midi Observatory (2876 m.,coords. 42.967, 0.141). Wikipedia. d) 3-Wind turbine from Rubió Windfarm (827 m ,coords. 41.673, 1.645) Google Earth. e) 4-Geographical landmark at Pico Cotiella, (2863 m, coords. 42.512, 0.319) Google Earth. f) 5-Espadas peak (3255 m, coords. 42.651, 0.427) Google Earth.	75
Figure 5-S7. RLS that receive lightning every year in Barrancabermeja without any current filter.	76
Figure 5-S8. a) Some RLS in Barrancabermeja. b) 1-Communication tower (90 m. cords 7.089322 - 73.953454). Google Earth. c) 2-Pylon coords. 6.675704° -73.921174°. Google Earth. d) 3-Mirabuenos, La Paz, Santander. (1308 m, coords. 6.2680 -73.6539) e) 4-Mountain chain in Santander Dpt. (1100 m, coords. 6.1792° -73.9358°).....	77
Figure 5-S9. The sensitivity analysis of the number of RLS versus a peak current threshold from 0 to 60 kA from the currents in the third quartile from every RLS candidate in Barrancabermeja (Colombia) region.	78
Figure 5-S10. Monthly distribution from lightning days in the RLS from Catalonia, separating those on the mountains and those on the coast	78
Figure 5-S11. Diurnal distribution of offshore RLS in Catalonia.	79

Índice de Tablas

Tabla 1. Caracterización de pulsos de campo eléctrico a escala de microsegundos asociados con varios procesos de rayos (Rakov, 2007).....	12
Tabla 2. Parámetros de las ondas de campo eléctrico producidas por descargas de retorno negativas en escala de microsegundos. (Rakov 2007)	14
Tabla 3. Parámetros de corriente del rayo para flashes negativos (Berger et al., 1972).....	18
Tabla 4. Estimación de la altura efectiva de algunas torres instrumentalizadas. (Adaptado de CIGRE TB 549, 2013).....	27
Tabla 5. Características (valores medios) de la fase inicial de los rayos ascendentes negativos (Adaptado de CIGRE TB 549, 2013).....	29
Tabla 6. Características (valores medios) de la fase inicial de los rayos ascendentes positivos (Adaptado de CIGRE TB 549, 2013).....	30
Tabla 7. Resumen valores de Flash DE en estudios de referencia.	48
Tabla 8. Resumen valores de Stroke DE en estudios de referencia.....	49
Tabla 9. Corriente de pico media y mediana de la distribución de corrientes para las 4 condiciones diferentes de DE en una región de EE. UU. con la red NLDN (CIGRE TF C4.404A, 2009).	51
Tabla 10. Media y desviación estándar de la distribución logarítmica normal de las corrientes de los rayos (IEC, 2006).....	52
Table S1. Current statistics of all strokes all over Catalonia (Spain) and at RLS. Currents are absolute values in kA.	76
Table S2. Current statistics of all strokes all over Barrancabermeja (Spain) and at RLS without any current filter applied and with the >30 kA (3rd quartile) filter applied. Currents are absolute values in kA.	76

Lista de Acrónimos

AEMET	Agencia Estatal de Meteorología
ALDIS	<i>Austrian Lightning Detection and Information System</i>
ASIM	<i>Atmosphere-Space Interactions Monitor</i>
CG	Rayo Nube-Tierra (<i>Cloud-To-Ground</i>)
CIGRE	Consejo Internacional de Grandes Sistemas Eléctricos
DE	Eficiencia de Detección (<i>Detection Efficiency</i>)
ECMWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
ENTLN	Earth Networks Total Lightning Network
ERA5	Reanálisis Atmosférico Global llevado a cabo por el ECMWF
FORTE	<i>Fast On-orbit Recording of Transient Events</i>
FRD	<i>Flash Rate Density</i>
GFD	Densidad de Rayos Nube-Tierra (<i>ground flash density</i>)
GLM	Geostationary Lightning Mapper
GPS	Sistema de Posicionamiento Global
GSD	Densidad de Descargas Nube-Tierra (<i>lightning ground stroke density</i>)
HF	Alta Frecuencia (<i>High Frequency</i>)
IC	Rayo Intra-Nube (<i>Intra-Cloud</i>)
ICC	Corriente Continua Inicial
IEC	Comisión Electrotécnica Internacional
ILDS MULT	valor que contrae verticalmente o dilata verticalmente la curva experimental
IS	Etapa Inicial (<i>Initial Stage</i>)
ISS	Estación Espacial Internacional (<i>International Space Station</i>)
JGR	<i>Journal of Geophysical Research</i>

LF	Baja Frecuencia (<i>Low Frequency</i>)
LINET	LIghtning detection NETwork
LIS	LIghtning Imaging Sensor
LLS	Sistemas de Localización De Rayos (<i>Lightning Location Systems</i>)
LPL	Nivel de Protección Contra El Rayo (<i>Lightning Protection Level</i>)
LPS	Sistema De Protección Contra Al Rayo (<i>Lightning Protection System</i>)
LRG	LIghtning Research Group
MDF	Encuentro de la Dirección del Campo Magnético (<i>Magnetic Direction Finding</i>)
MTG-LI	LIghtning Imager en el satélite Meteosat Third Generation
NASA	Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio de los Estados Unidos
NLDN	Red Nacional de Detección de Rayos (NLDN) de EE. UU.
OTD	Optical Transient Detector
PDD	Detector de Fotodiodos (<i>Photodiode Detector</i>)
RLS	Localización con Impactos de Rayos Recurrentes (<i>Recurrent Lightning Spot</i>)
RS	Descarga de Retorno (<i>Return Stroke</i>)
TF	Task Force
TOA	Tiempo De Llegada (<i>Time Of Arrival</i>)
UHF	Ultra Alta Frecuencia
UPC	Universitat Politècnica de Catalunya
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
VHF	Muy Alta Frecuencia (<i>Very High Frequency</i>)
VLF	Muy Baja Frecuencia (<i>Very Low Frequency</i>)
WWLLN	World Wide Lightning Location Network

1 Introducción

El rayo es un fenómeno extraordinario que desde siempre ha fascinado a la humanidad. Está presente en nuestra vida y frente a él necesitamos prevención y protección en todo tipo de actividades humanas al aire libre, por el peligro que puede suponer el alcance de un rayo. A nivel global, según diversos estudios cuyos resultados se han recogido en Holle (2016), las muertes por rayos se estiman entre unos miles, 6.000 y 24.000 personas al año. No solo son un peligro para las personas, sino también para estructuras, edificios, sistemas eléctricos y electrónicos, transporte, entre otros.

Uno de los elementos sensibles al impacto de rayos son los aerogeneradores debido a que son estructuras elevadas muy expuestas a los rayos que incluso los pueden iniciar. Su aparición en el paisaje es reciente (a partir de segunda mitad del siglo XX) y ha ido en aumento, representando actualmente 906 GW de potencia instalada a nivel mundial, según datos del Global Wind Energy Council (2022). La Unión Europea se ha comprometido a continuar avanzando para llegar a la neutralidad del carbono en 2050 y una de las formas para compensar emisiones es la inversión en energías renovables, por lo que se prevé que la producción de energía eólica aumente aún más en los próximos años. El Global Wind Energy Council (2022) indica que la energía eólica de 2021 a 2030 se tiene que cuatriplicar para poder alcanzar los objetivos de la neutralidad del carbono en 2050.



Figura 1. Aerogenerador impactado por un rayo cerca de Brieke (Alemania), en julio de 2009. (Adaptado de Better Plan, 2023).

Los aerogeneradores son estructuras elevadas que, al igual que las torres de más de 100 m, son expuestas a fuertes campos eléctricos locales bajo las nubes de tormenta, como indica Berger (1967). Si, además, las

estructuras elevadas están situadas en una cima de montaña, su altura efectiva aún se considera superior a la altura propia de la estructura (Rizk, 1990; Rachidi et al., 2008). Otra característica es que las palas las tienen en rotación, según Pineda et al. (2018) casi el 40% de su altura gira, y varios estudios sugieren que esta rotación hace más susceptible el impacto de rayos (Rachidi et al., 2008; Wand and Takagi, 2012; Montanyà et al., 2014). Por lo que, en general, un aerogenerador tiene más probabilidad de ser impactado por un rayo (Rachidi et al., 2008; Wand and Takagi, 2012).

Las palas están formadas por materiales como poliéster o epoxy reforzado con fibra de vidrio y también se utiliza fibra de carbono o aramidas (Kevlar) como material de refuerzo. Este tipo de materiales dificultan el buen funcionamiento del sistema de protección frente al rayo (*lightning protection system*, LPS), debido a su conductividad baja y no homogénea. Este hecho, favorece la aparición de fallos cuando pasan las corrientes de rayos, resultando en incidencias cada año, que representan costes significativos de reparación y mantenimiento, y también pérdida de rendimiento de producción eléctrica (Braam et al., 2022; Garolera et al., 2014; Montanyà, 2016; March, 2016). El conocimiento actual sobre el rayo no permite la comprensión suficiente para asegurar una completa prevención y protección.

Conocer la actividad de rayos de la zona es importante para la planificación de un parque eólico y también para su funcionamiento. Tradicionalmente, se ha tratado el análisis de la actividad del rayo en distintas regiones mediante dos parámetros principales: la densidad de rayos, es decir, número de rayos por unidad de área y tiempo ($\text{rayos} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}$) y el número de días en que se han detectado rayos (días de tormenta eléctrica). Al observar mapas de densidad de rayos, se destacan las áreas con más densidad, que se llaman *hot spots* en la literatura. Se han publicado numerosos estudios de este tipo en todo el mundo, como Albrecht et al. (2018) de alcance mundial a partir de datos de satélite del instrumento Lightning Imaging Sensor (LIS), donde el Lago Maracaibo en Venezuela era el mayor hot spot. Otros estudios son Enno et al. (2020) o Oda et al. (2022).

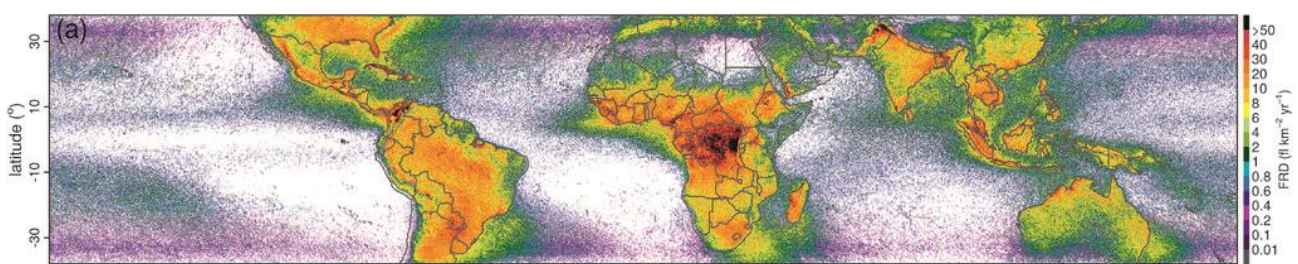


Figura 2. Climatología de rayos totales de muy alta resolución horizontal (0.1°) de 16 años (1998–2013) de observaciones de rayos totales TRMM LIS, Número de flahes por km^2 por año (Flash Rate Density, FRD) ($\text{fl km}^{-2} \text{año}^{-1}$). Adaptado de Albrecht et al. (2018).

Estructuras elevadas como aerogeneradores o torres de telecomunicaciones pueden presentar una densidad de rayos mayor respecto a la densidad de rayos de las zonas de alrededor a la instalación, pero no se refleja directamente en el concepto de *hot spot*. Un *hot spot* va asociado a un área grande, de tamaño variable según el estudio, y además se puede ver alterado por episodios puntuales alta actividad de rayos a tierra porque un *hot spot* busca la mayor densidad de rayos. La característica que pueden tener estas instalaciones elevadas es la frecuencia de impacto de rayos. A raíz de esta reflexión, se plantea la primera pregunta de investigación:

1. ¿Pueden existir lugares donde impacta un rayo de forma periódica? ¿Cómo definirlos y qué características presentan?

Otra consideración que se podría tener en cuenta en la protección de estructuras como aerogeneradores, aparte de conocer la densidad de rayos, es la corriente asociada al rayo. También cuando se trata de líneas eléctricas de transmisión y distribución, para hacer los cálculos de los modelos de sobretensiones, la entrada principal es la corriente de pico del rayo. En general, tal como indica Said et al. (2013), las medidas de corriente pico del rayo son de fundamental interés, ya que cuantifican la fuerza de la fase impulsiva de la descarga de retorno.

Existe el fenómeno de los *superbolts*, son los rayos más potentes que se detectan, que están relacionados con rayos de altas corrientes. En Holzworth et al. (2019), los casos que pudieron relacionar con rayos detectados por un sistema de localización de rayos (*lightning location systems*, LLS) convencional, la corriente de pico media de los *superbolts* negativos coincidentes era -267 kA.

Conocer donde se ubican las intensidades más extremas de los rayos de una zona podría aportar conocimiento de cara a una mejor protección contra el rayo, pues actualmente los estándares de protección contra el rayo, se basan únicamente en la densidad de rayos de la zona. Se podría también tener en cuenta si el equipo a proteger está en una zona de alta actividad de corrientes extremas. Para ello, se quiere abordar la segunda pregunta de investigación:

2. ¿Qué zonas geográficas acumulan los impactos de rayo de intensidad más alta?

Cuando la protección frente al rayo no es efectiva en los aerogeneradores y estos acaban con daños, los operadores del parque y/o el fabricante solicitan un análisis de causa-raíz para comprobar que el daño fue causado por un rayo, qué día sucedió, corriente, etc. A veces no se tiene registro de cuando ocurrió el rayo, pero a veces, cuando hay un daño por rayo en una pala, este no impide su rotación, y esta continua rotación aumenta y agrava el daño en la pala, tal como explica Matsui et al. (2022). Por este motivo, no se percibe que han habido daños hasta que no hay una inspección visual de las turbinas del parque, proceso que depende de la operativa de mantenimiento y que es difícil de llevar a cabo si hay mal tiempo; o bien hasta que la máquina deja de funcionar completamente, cuando se ha producido un daño más severo. Este daño más severo se puede originar unos días después del impacto de rayo, fruto del continuo funcionamiento con un daño existente. A partir de diversos estudios reales de análisis de causa-raíz, que incluyen datos de rayos obtenidos por un LLS para identificar el rayo que ha dañado el aerogenerador, se podrían caracterizar el tipo de rayos que dañan aerogeneradores. Este interés generó la tercera pregunta de investigación:

3. ¿Qué características tienen los rayos detectados por un LLS que dañan aerogeneradores y que aparecen en informes de análisis causa-raíz de casos reales?

1.1 Objetivos

El objetivo principal de la tesis es la caracterización de la actividad de rayos para aplicaciones de ingeniería como aerogeneradores y, en general, estructuras elevadas.

Los objetivos específicos de esta tesis, enfocados para responder a las preguntas de investigación que se han planteado, son:

1. Investigar las localizaciones que suelen recibir rayos. Definir este concepto nuevo, distinto al tradicional *hot spot*, que son las localizaciones que tienen más rayos. Estas ubicaciones serían independientes de episodios puntuales de alta actividad de rayos y deberían tenerse en cuenta a la hora de planificar la construcción de parques eólicos, torres de comunicación, líneas de distribución o actividades con riesgos asociados al rayo como almacenes de materiales inflamables. Se puede convertir en un concepto importante a tener en cuenta en la protección contra el rayo.
2. Estudiar la distribución geográfica de corrientes extremas a través de mapas, que permitan mejorar la protección contra el rayo en zonas de altas corrientes. Analizar en qué época ocurren, qué zonas destacan, diferencia entre rayos con diferente polaridad. Aportar un conocimiento que podría incorporarse en normativas en un futuro, para una mejor protección contra el rayo
3. Estudiar y caracterizar los rayos cercanos a aerogeneradores que han tenido incidencias por rayo. Se trata de, a partir de casos de incidencias en aerogeneradores, hacer un análisis de datos de rayos obtenidos con un LLS que dañan aerogeneradores y así aportar al conocimiento de este tipo de rayos para su prevención y protección.

Para lograr estos objetivos serán indispensables los datos de rayos procedentes de un LLS. Como trabajo experimental, el objetivo es la instalación de un nuevo LLS en la Península Ibérica. Por una parte, estos sistemas permiten detectar las tormentas para mejorar la seguridad contra el rayo, con la prevención y predicción, y por otra permiten tener información de si ha habido rayos para hacer mantenimiento de sistemas que han podido verse afectados por la caída de rayos, reconocer daños, proteger la actividad humana industrial y también permiten poder hacer estudios del comportamiento de las tormentas en el área donde se detectan rayos con distintos fines.

1.2 Estructura de la tesis

Este trabajo está dividido en 9 capítulos. Los tres estudios principales y que responden a las preguntas de investigación planteadas son:

1. Localizaciones con impactos de rayos recurrentes, en el capítulo 5 en formato de artículo.
2. Distribución geográfica de rayos de corrientes extremas, en el capítulo 6.
3. Caracterización de rayos que afectan aerogeneradores a partir de datos de rayos de un LLS, en el capítulo 7.

Previamente, el primer capítulo presenta la introducción y los objetivos principales. El segundo capítulo es el estado del arte actual de los distintos conceptos que se tratarán y discutirán en este trabajo.

El tercer capítulo expone la instalación y mantenimiento del LLS LINET en España y Portugal para obtener el histórico de datos de rayos necesario para los tres estudios principales de esta tesis.

Una de las dificultades de las mediciones de rayos mediante LLS, es conocer la incertidumbre en la eficiencia de detección. Los parámetros específicos que contribuyen a la incertidumbre son la corriente de pico, la velocidad de la descarga de retorno, la propagación del campo electromagnético, el umbral de detección del sensor, entre otros. Los distintos factores que afectan a la incertidumbre se presentan en el capítulo 4 y se propone un método basado en el grupo de CIGRE TF C4.404A (2009) para calcularla. Con este método se evalúa el LLS instalado y calculamos la eficiencia de detección del área geográfica de los estudios presentados en esta tesis.

En el capítulo 8, se encuentran las conclusiones de los estudios expuestos en los capítulos anteriores y los trabajos futuros a partir de los resultados de los estudios.

Posteriormente, se encuentran las referencias bibliográficas en el capítulo 9.

Finalmente, se incluye un anexo con el detalle del procedimiento para el cálculo de la eficiencia de detección de un LLS, ampliando la explicación del capítulo 4.

2 Estado del arte

En este capítulo se introducen los principales conceptos del fenómeno del rayo y su conocimiento actual como punto de partida para el trabajo que se ha llevado a cabo en esta tesis.

2.1 El rayo: formación, tipología y parámetros

2.1.1 Nubes de tormenta

El rayo es una descarga eléctrica de alta corriente que se origina en las nubes de tormenta, en las típicamente llamadas cumulonimbos, las más grandes y energéticas de la atmósfera. Rakov (2021), describe la nube de tormenta como un gran motor térmico en la atmósfera, donde la energía entrante proviene del sol y el agua es el agente de transferencia de calor. Las principales salidas de este motor son:

1. El trabajo mecánico de los vientos verticales y horizontales de la tormenta.
2. Lluvia y granizo por la parte inferior de la nube (condensación del vapor de agua).
3. Descargas eléctricas dentro, por encima y por debajo de la nube que incluyen: rayos y otros fenómenos como sprites, jets , etc.

Para que se produzca un rayo, primero una nube de tormenta se desarrolla en 2-3 km en la atmósfera, por debajo del punto de congelación. También se necesita una separación de la carga eléctrica, que se produce mediante las colisiones entre partículas pequeñas y blandas de granizo y cristales de hielo. Estas partículas requieren que la nube tenga la presencia de agua en los tres estados simultáneamente: sólido, líquido y gaseoso. Estas colisiones van pasando la carga negativa a las partículas de granizo y se van separando hasta que se produce un campo eléctrico suficientemente grande para que ocurra una ruptura de la rigidez dieléctrica, y es cuando se produce un rayo. Diferentes condiciones meteorológicas propician la aparición de rayos: tormentas ordinarias de verano, tormentas severas (con granizo o tornados), huracanes, tormentas de nieve, convección oceánica y sistemas convectivos de mesoescala. Todas ellas comparten la región de fase mixta activa, tal como explica Williams, 2003.

Por otra parte, las distribuciones de carga eléctrica de las nubes, tal como lo introdujeron Simpson and Scrase (1937) y Simpson and Robinson (1941) mediante medidas de sondaje eléctrico en las nubes de tormenta, las identificaron con una estructura tripolar: en lo más alto carga positiva, negativa en el medio y en la parte más baja una región pequeña de carga positiva (Figura 3). La región principal de carga negativa en la nube suele situarse entre -10 y -20 °C tal como se muestra en la Figura 4.

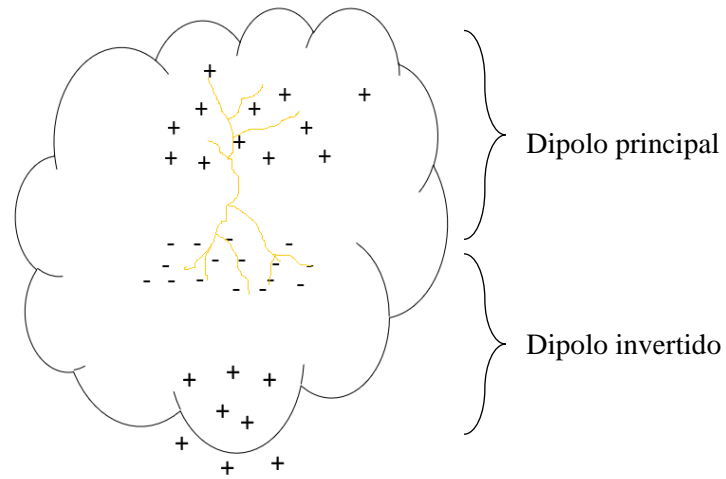


Figura 3. Estructura de carga eléctrica tripolar de la nube. (Adaptado de Williams, 2003).

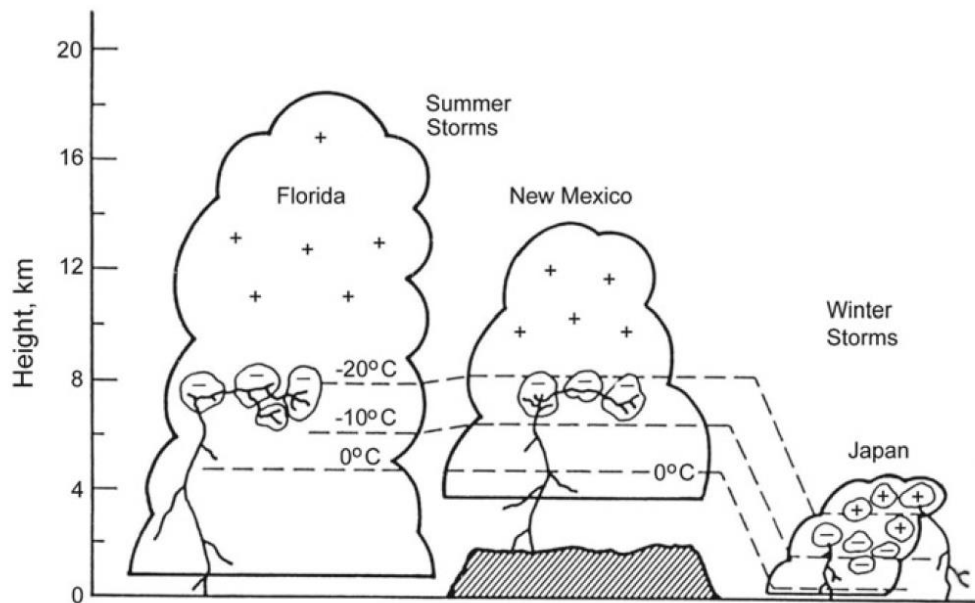


Figura 4. Alturas típicas de las distribuciones de carga eléctrica en diferentes regiones: tormentas de verano en Florida y Nuevo México, y en tormentas invernales en Japón. (Adaptado de Krehbiel, 1986)

2.1.2 Tipos de descargas de rayos

Hay descargas de rayos que se producen por encima de la nube, en la alta atmósfera. como los *sprites*, *halos*, *elves*, *blue starters*, *blue jets* o los *jets gigantes*, como se muestra en la Figura 5.

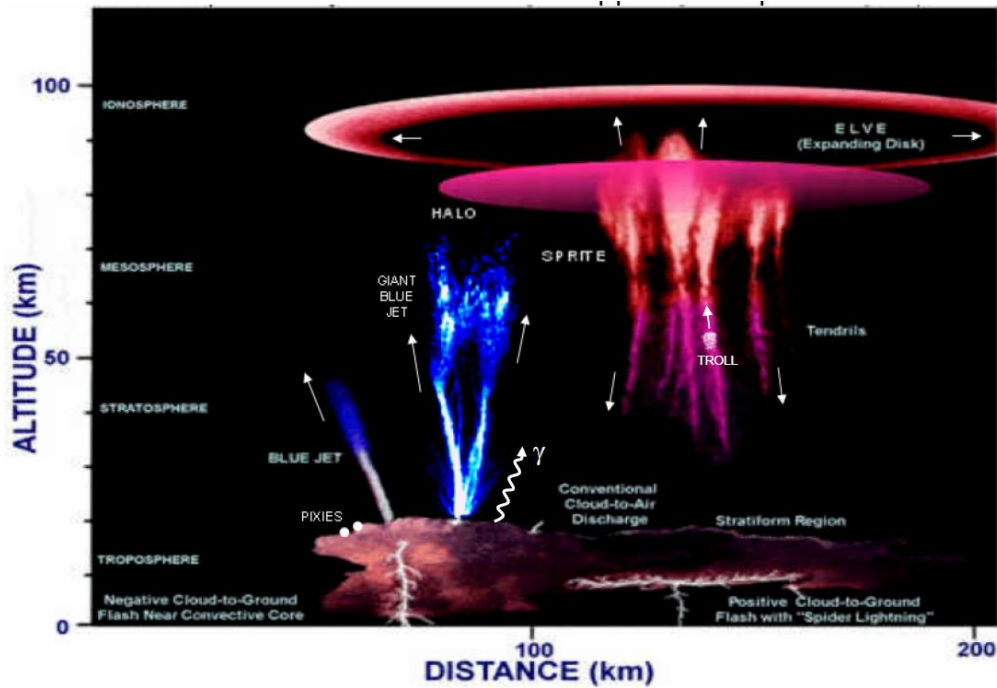


Figura 5. Distintos tipos de descargas eléctricas que se producen en las tormentas en la atmósfera de la tierra (Rakov, 2007, imagen elaborada por D. Setman a partir de Lyons et al., 2000)

En esta tesis nos referiremos a las descargas de rayos de dentro de la nube y las que descargan a tierra, que son las que mayormente ocurren en las tormentas y las que interfieren con la actividad humana. Entonces, existen cuatro tipos de descargas de rayos en la nube y que descargan por debajo de ella, según si alcanzan o no la superficie terrestre, representadas en la Figura 6. Las que se producen en las nubes, que configuran la mayoría de los rayos de una tormenta (67-75%), son las llamadas intra-nube (*intra-cloud*, IC). En general, se llaman IC a los tres tipos de rayos que se inician en la nube y que no llegan a tierra, pero el término IC sería propio del rayo que ocurre únicamente dentro de la nube (Figura 6.a); el nube-nube, el rayo que descarga entre dos nubes separadas (Figura 6.b); y el nube-aire, que descarga entre la parte negativa de la nube y la región positiva que queda en la zona más baja, sin contacto con el suelo (Figura 6.c). El rayo que descarga a tierra y que representa el 25-33% de los casos, es el llamado nube tierra (*cloud-to-ground*, CG). Los rayos IC son los que dominan al inicio de una tormenta y los CG aparecen con más frecuencia en la fase de maduración.

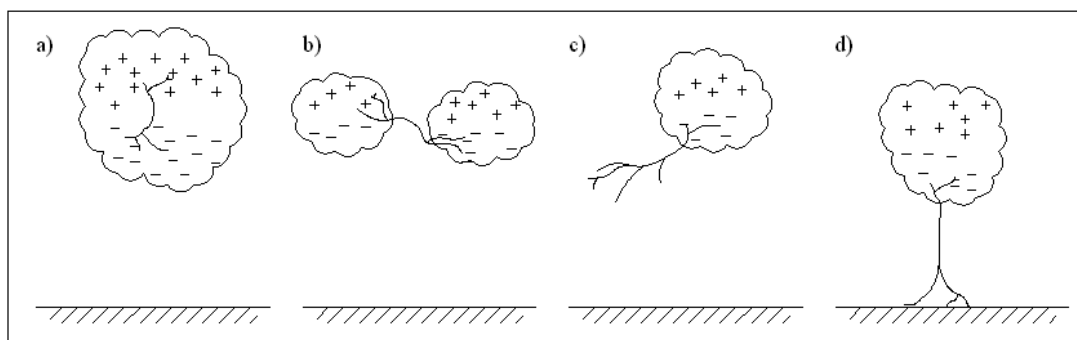


Figura 6. Tipos de rayos en las nubes: a) Intra-nube; b) Nube-nube y c) Nube-aire. d) Descarga nube-tierra. (Adaptado de Rakov and Uman, 2003).

Los rayos CG se clasifican según su polaridad (positiva/negativa) y sentido (ascendente/descendente). Sobre el 90% de las descargas de rayo CG mundiales son descendentes, donde la carga negativa se transporta hacia la tierra. Otros tipos de rayo CG son los descendentes positivos, los ascendentes negativos y los ascendentes positivos (ver Figura 7).

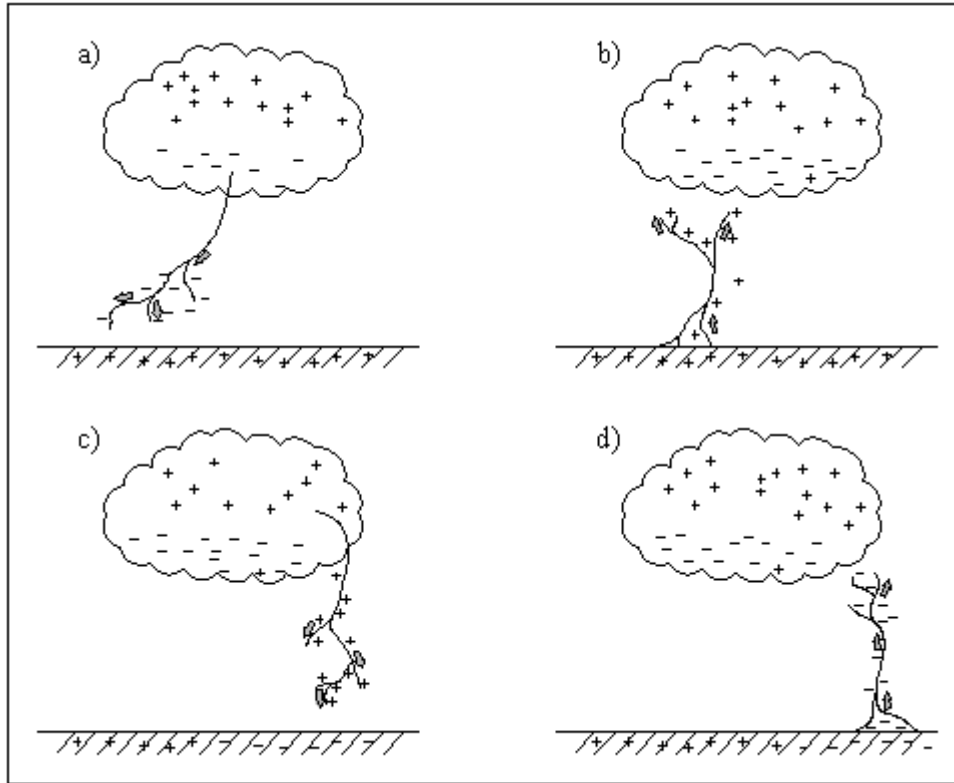


Figura 7. Tipos de rayo según carga efectiva transferida: a) Rayo negativo descendente; b) Rayo positivo ascendente; c) Rayo positivo descendente; d) Rayo negativo ascendente. (Adaptado de Rakov y Uman, 2003).

Una descarga de rayo completa tanto si descarga a tierra como si no, se llama *flash* y puede tener varias descargas (*strokes*).

2.1.3 Mecanismo de un rayo a tierra

El proceso de un rayo CG comienza con un proceso de ruptura eléctrica en la nube que conduce a formar un canal de plasma altamente conductor llamado *stepped-leader* (líder escalonado), que descenderá hasta el suelo de forma escalonada, tal como indica su nombre. Cuando este líder se acerca al suelo a unos pocos cientos de metros, el campo eléctrico en la punta de las estructuras altas aumenta y estas pueden iniciar descargas eléctricas ascendentes si su campo eléctrico excede el valor de ruptura dieléctrica del aire. Cuando el líder se conecta a una de estas descargas, se produce el proceso unión (*attachement process*) y entonces, una onda, de potencial cercano al de tierra, viaja a lo largo del canal hacia la nube. El evento luminoso asociado que viaja hacia la nube con una velocidad cercana a la velocidad de la luz, se denomina primera descarga de retorno (*return stroke, RS*). Tanto el líder escalonado como la RS sirven para transportar carga de la nube a tierra. Un

mismo flash puede tener varias descargas (*strokes*) para acabar de neutralizar la carga de la nube, las que suceden después de la primera RS, se llaman descargas subsecuentes (*subsequent strokes*).

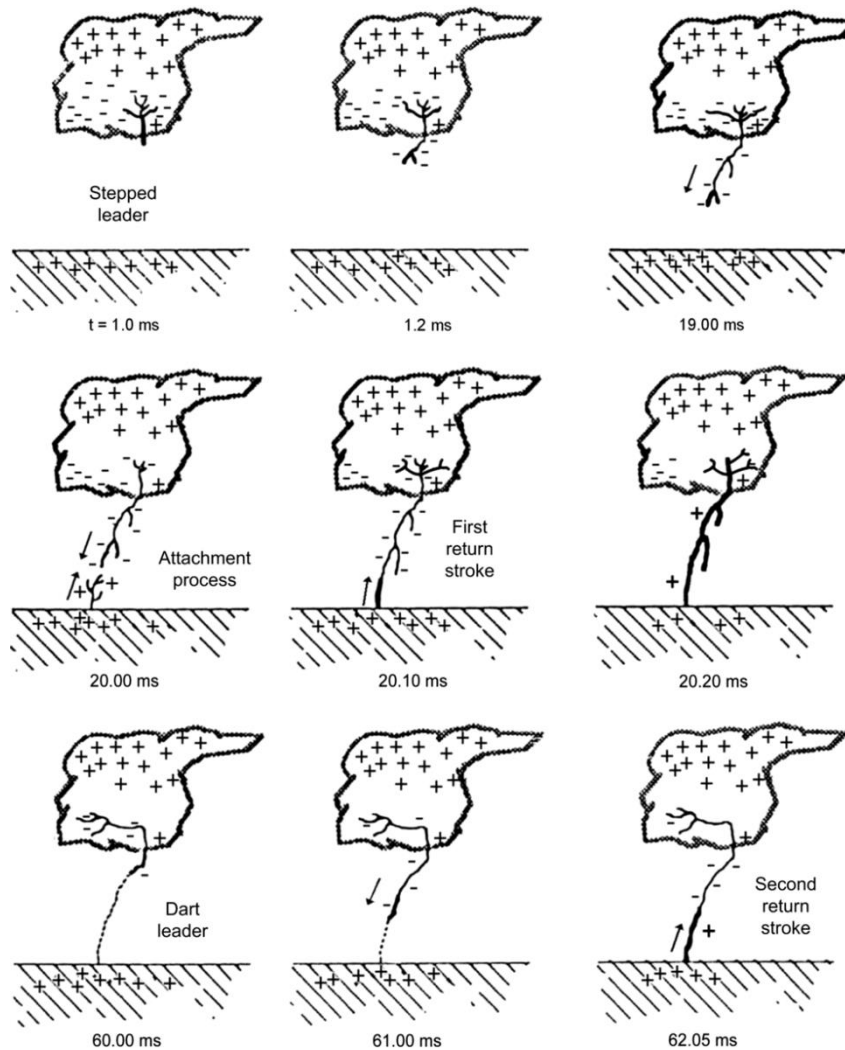


Figura 8. Esquema del proceso de descarga de un CG negativo. (Uman, 2013).

2.1.4 Campos eléctricos y electromagnéticos que genera un rayo

En condiciones de buen tiempo, el campo eléctrico cerca de la superficie de la Tierra es de unos 100 V/m y aumenta con la altitud.

Clásicamente, la Tierra se ha visto como un condensador esférico con pérdidas donde la capa exterior es la electroesfera y la capa interior es la superficie de la Tierra p. ej. en Uman (1974). Dado que el potencial de la electroesfera (altitud de unos 60 km) es de alrededor de 300 kV con respecto a la superficie de la Tierra y la resistencia de carga global con buen tiempo es de unos 300 Ω , los rayos se consideran las fuentes en este circuito global, que transportan la carga negativa hacia la tierra. La carga positiva se asume que se filtra por la parte superior de las nubes hacia la electroesfera, (adaptado de Rakov, 2013). Sin embargo, esto permanece aún en estudio y es un tema de discusión.

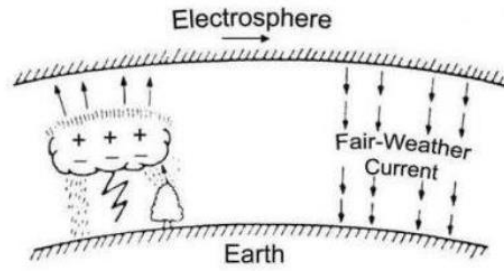


Figura 9. Ilustración del circuito global eléctrico. (Rakov, 2013).

Esta intensa descarga eléctrica de la nube de tormenta a la tierra que es el rayo, emite ondas de campo eléctrico y magnético principalmente por la primera RS y las descargas RS subsecuentes que se expanden a una distancia entre 1 a 200 km (adaptado de Rakov, 2021). La Tabla 1 presenta la caracterización de los pulsos de campo eléctrico medidos para diferentes procesos de rayos y la Figura 6 muestra varias formas de onda típicas.

Tabla 1. Caracterización de pulsos de campo eléctrico a escala de microsegundos asociados con varios procesos de rayos (Rakov, 2007).

	Type of Pulses	Dominant Polarity		Typical Total Pulse Duration, μs	Typical Time Interval Between Pulses, μs	Comments
		Atmospheric Electricity Sign Convention	Physics Sign Convention			
CGs	Initial breakdown in negative ground flashes	Positive	Negative	20-40	70-130	Some milliseconds to some tens of milliseconds before the first return stroke
	Stepped leader in negative ground flashes	Positive	Negative	1-2	15-25	Within 200 μs just prior to a return stroke
	Dart-stepped leader in negative ground flashes	Positive	Negative	1-2	6-8	Within 200 μs just prior to a return stroke
	Return stroke in negative ground flashes	Positive	Negative	30-90 (zero-crossing time)	60×10^3	3-5 pulses per flash
ICs	Initial breakdown in cloud flashes	Negative	Positive	50-80	600-800	The largest pulses in a flash
	Narrow bipolar pulses	Negative/ Positive	Positive/ Negative	10-20	-	Probably associated with the initial breakdown in cloud flashes
Both CGs and ICs	Regular pulse burst in both cloud and negative ground flashes	Both polarities are about equally probable		1-2	5-7	Occur later in a flash; 20-40 pulses per burst

Aunque existen campos eléctricos y electromagnéticos en cada paso escalonado de la descarga a tierra, se destaca el asociado RS que es el más significativo y el que se mide en los LLS. Las características principales de dichos campos electromagnéticos se resumen en la Tabla 2.

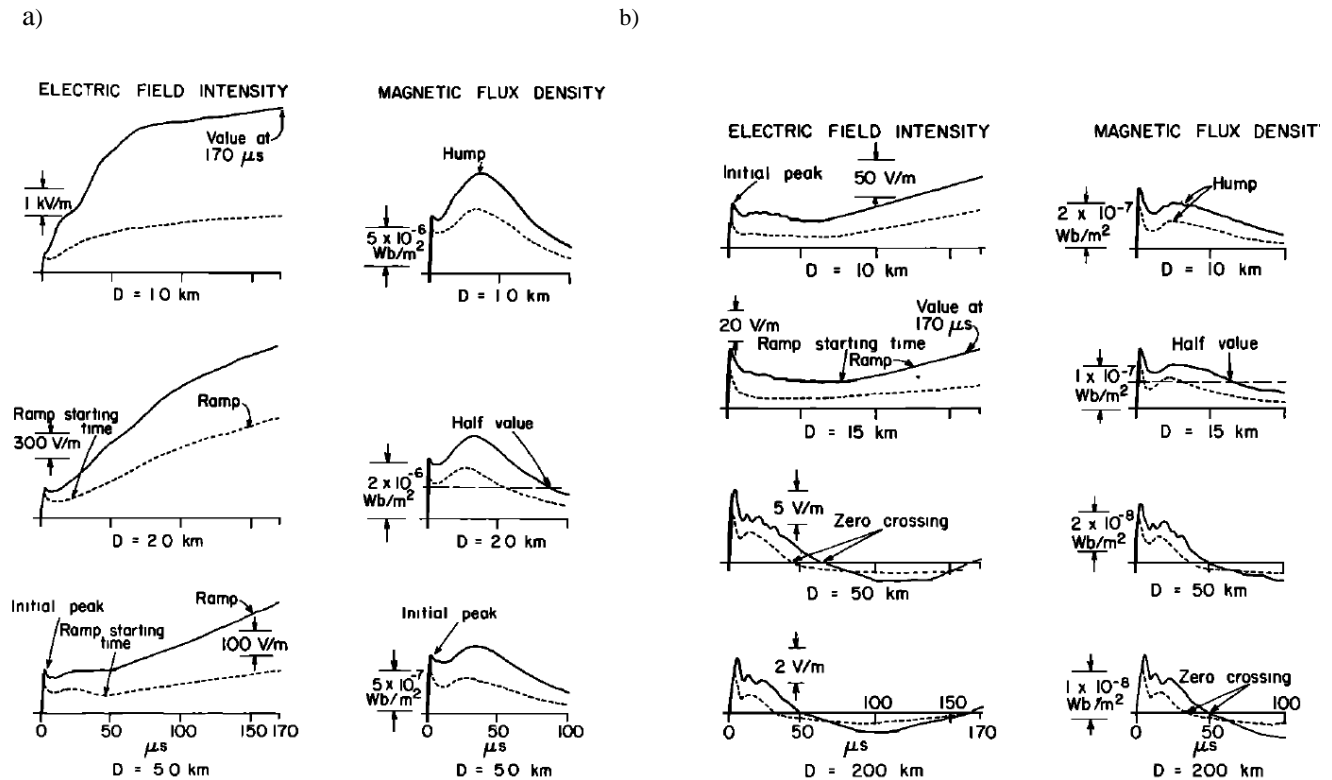


Figura 10. a) Intensidad típica del campo eléctrico (columna de la izquierda) y densidad de flujo magnético (columna de la derecha) para la primera (línea continua) y las siguientes (línea de puntos) RS a distancias de 1, 2 y 5 km. Se identifican los siguientes rasgos característicos de las formas de onda: para campo eléctrico, pico inicial, tiempo de inicio de rampa, rampa y valor 170 μ s; para campo magnético, pico inicial, máximo y valor medio. b) Campos típicos como se describe en la figura la para distancias de 10, 15, 50 y 200 km. Las características de forma de onda características identificadas, además de las anotadas en las gráficas inferiores, son el paso por cero de campos eléctricos y magnéticos. (Adaptado de Lin et al., 1979)

En la Tabla 2 se exponen las características del campo eléctrico de la RS procedentes de diferentes estudios científicos.

2.Estado del arte

Tabla 2. Parámetros de las ondas de campo eléctrico producidas por descargas de retorno negativas en escala de microsegundos. (Rakov 2007)

Parameter	Location	First strokes			Subsequent strokes		
		Sample size	Mean	SD	Sample size	Mean	SD
Initial peak ($V m^{-1}$) (normalized to 100 km)							
Rakov and Uman (1990b)	Florida	76	5.9 (GM)		232 ^a 38 ^b	2.7(GM) 4.1(GM)	
Cooray and Lundquist (1982)	Sweden	553	5.3	2.7			
Lin et al. (1979)	KSC	51	6.7	3.8	83	5.0	2.2
	Ocala	29	5.8	2.5	59	4.3	1.5
Zero-crossing time (μs)							
Cooray and Lundquist (1985)	Sweden	102	49	12	94	39	8
	Sri Lanka	91	89	30	143	42	14
Lin et al. (1979)	Florida	46 ^c	54	18	77 ^c	36	17
Zero-to-peak rise time (μs)							
Master et al. (1984)	Florida	105	4.4	1.8	220	2.8	1.5
Cooray and Lundquist (1982)	Sweden	140	7.0	2.0			
Lin et al. (1979)	KSC	51	2.4	1.2	83	1.5	0.8
	Ocala	29	2.7	1.3	59	1.9	0.7
10-90 percent rise time (μs)							
Master et al. (1984)	Florida	105	2.6	1.2	220	1.5	0.9
Slow front duration (μs)							
Master et al. (1984)	Florida	105	2.9	1.3			
Cooray and Lundquist (1982)	Sweden	82	5.0	2.0			
Weidman and Krider (1978)	Florida	62	4.0	1.7	44	0.6	0.2
		90	4.1	1.6	120 34 ^d	0.9 2.1	0.5 0.9
Slow front, amplitude as percentage of peak							
Master et al. (1984)	Florida	105	28	15			
Cooray and Lundquist (1982)	Sweden	83	41	11			
Weidman and Krider (1978)	Florida	62	50	20	44	20	10
		90	40	20	120 34 ^d	25 40	10 20
Fast transition, 10-90 percent risetime (ns)							
Master et al. (1984)	Florida	102	970	680	217	610	270
Weidman and Krider (1978)	Florida	38	200	100	80	200	40
		15	200	100	34	150	100
Weidman and Krider (1980a, 1984); Weidman (1982)	Florida	125	90	40			
Peak time derivative (normalized to 100 km) ($V m^{-1} \mu s^{-1}$)							
Krider et al. (1996)	Florida	63	39	11			
Time derivative pulse width at half-peak value (ns)							
Krider et al. (1996)	Florida	61	100	20			

If not specified otherwise, multiple lines for a given source for the same location correspond to different thunderstorms. GM = geometric mean value, a better characteristic of the distribution of initial field peaks since this distribution is approximately log-normal.

^a Strokes following previously formed channel.

^b Strokes creating new termination on ground.

^c Both electric and magnetic fields.

^d Subsequent strokes initiated by dart-stepped leaders. Other subsequent strokes studied by Weidman and Krider (1978) were initiated by dart leaders.

El campo eléctrico medido por un rayo en la nube dura entre 200 ms y 500 ms. El estudio más extenso sobre los campos electromagnéticos de los rayos en las nubes fue desarrollado por Kitagawa y Brook (1960), que dividieron las variaciones de campo en: una porción inicial, una porción muy activa y una porción posterior. De las 1400 descargas de nubes estudiadas (Figura 11), el 50% de ellas incluían estas tres porciones y el 40% tenían dos porciones: la muy activa y la posterior. Otros autores que dan más características son: Schonland (1956); Proctor (1981); Bils et al. (1988) y Villanueva et al. (1994).

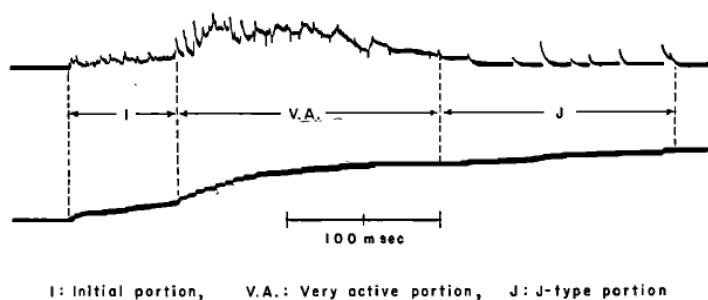


Figura 11. Diagrama de los cambios de campo eléctrico típico de la descarga de nubes. Las trazas superior e inferior son registradas simultáneamente por antenas rápidas y lentas, respectivamente. (Adaptado de Kitagawa y Brook 1960).

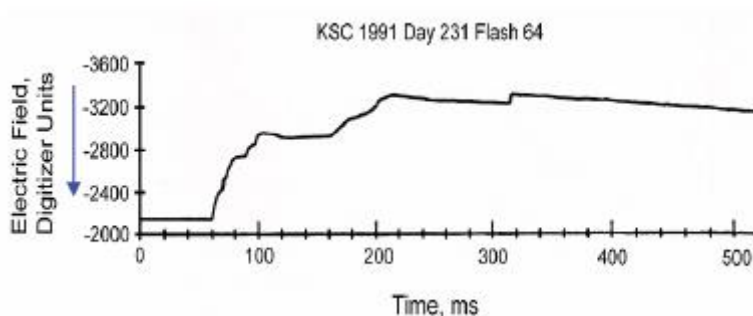


Figura 12. Gráfico de campo eléctrico para rayo IC del día 231 en 1991 en el Centro Espacial Kennedy, Florida. (Adaptado de Villanueva et al., 1994).

2.1.5 Corriente y otros parámetros del rayo

A partir de las medidas de corriente llevadas a cabo por Berger en el Monte San Salvatore entre 1963 y 1971 (como Berger, 1972; Berger et al., 1975), se presentan en la Figura 13 las distribuciones estadísticas acumulativas de las corrientes pico de rayos para (1) primeras descargas (*strokes*) negativas, (2) primeras descargas positivas, (3) primeras descargas negativas y positivas, y (4) rayos negativos posteriores. Esta figura aparece en la todos los estándares de protección contra rayos nacionales e internacionales p.e. IEEE Std 1410-2010, IEEE Std 1243-1997, IEC 62305-1. Son distribuciones logarítmicas normales y dan el porcentaje de casos que superan el valor de corriente indicado en las abscisas.

En los estudios científicos, los valores máximos de pico de corriente no superan los 300 kA. La distribución de corriente de pico para las primeras descargas negativas, que se incluyen en las normativas p. ej. IEC 62305-1, se basan en las medidas de corriente continua llevadas a cabo por Berger en Suiza de 1963 a 1971 (adaptado de CIGRE TB 549, 2013). La Figura 13 se basa en unas 100 mediciones de corriente continua de Berger. El valor de corriente pico mínimo incluido en las distribuciones de Berger es de 2 kA y no se observaron primeras descargas (*first strokes*) con corrientes pico por debajo de 5 kA.

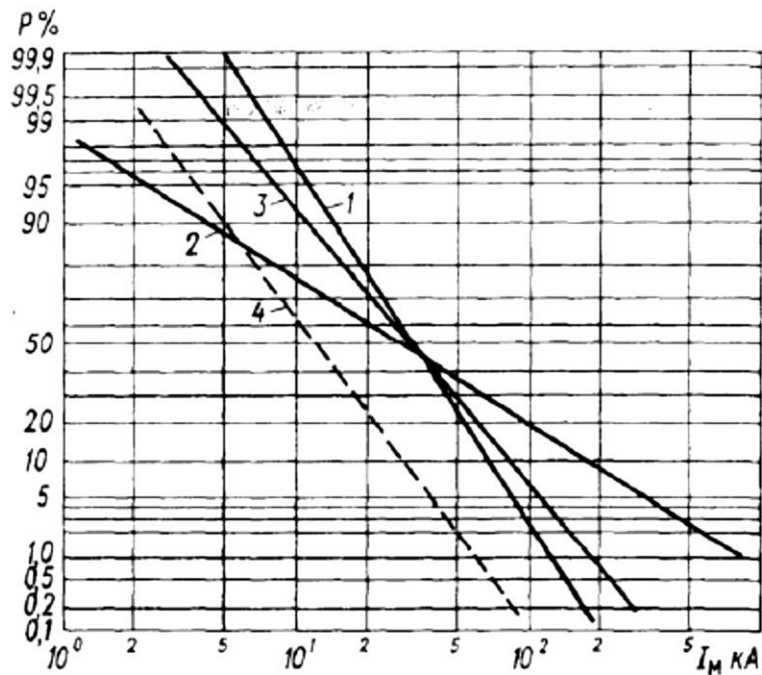


Figura 13. Distribuciones estadísticas acumulativas de las corrientes máximas de los rayos, que dan el porcentaje de casos que superan el valor de abscisas, a partir de mediciones directas en Suiza. (Adaptado de Bazelyan et al., 1978).

En los estándares de protección contra rayos, para aumentar el tamaño de la muestra, los datos de Berger a menudo se complementan con una serie de mediciones de corriente continua en Sudáfrica y con mediciones indirectas de corriente de rayo menos precisas obtenidas (en diferentes países) usando *magnetic links*, que corresponden a mediciones indirectas a partir del campo magnético inducido en pequeñas piezas de material magnético, llamadas enlaces magnéticos que se montan en soportes y se instalan en una torre de distribución (Nature 132, 1933). Hay dos distribuciones principales de corrientes máximas de rayos para las primeras descargas de retorno negativas adoptados por los estándares de protección contra rayos: la distribución IEEE (p. e. IEEE Std 1410–2010; IEEE Std 1243–1997; Anderson, 1982) y la distribución CIGRE (p.e. Anderson y Eriksson, 1980). Ambas distribuciones de corriente de rayos globales se presentan en la Figura 14 (CIGRE 63, 1991), que corresponden a las distribuciones estadísticas acumulativas de corrientes máximas de las primeras descargas (*strokes*), es decir, el porcentaje del eje vertical se resta al 100% para obtener la probabilidad de exceder el valor de corriente máxima del eje horizontal. Para la distribución CIGRE, el 98% de las corrientes pico superan los 4 kA, el 80% superan los 20 kA y el 5% superan los 90 kA.

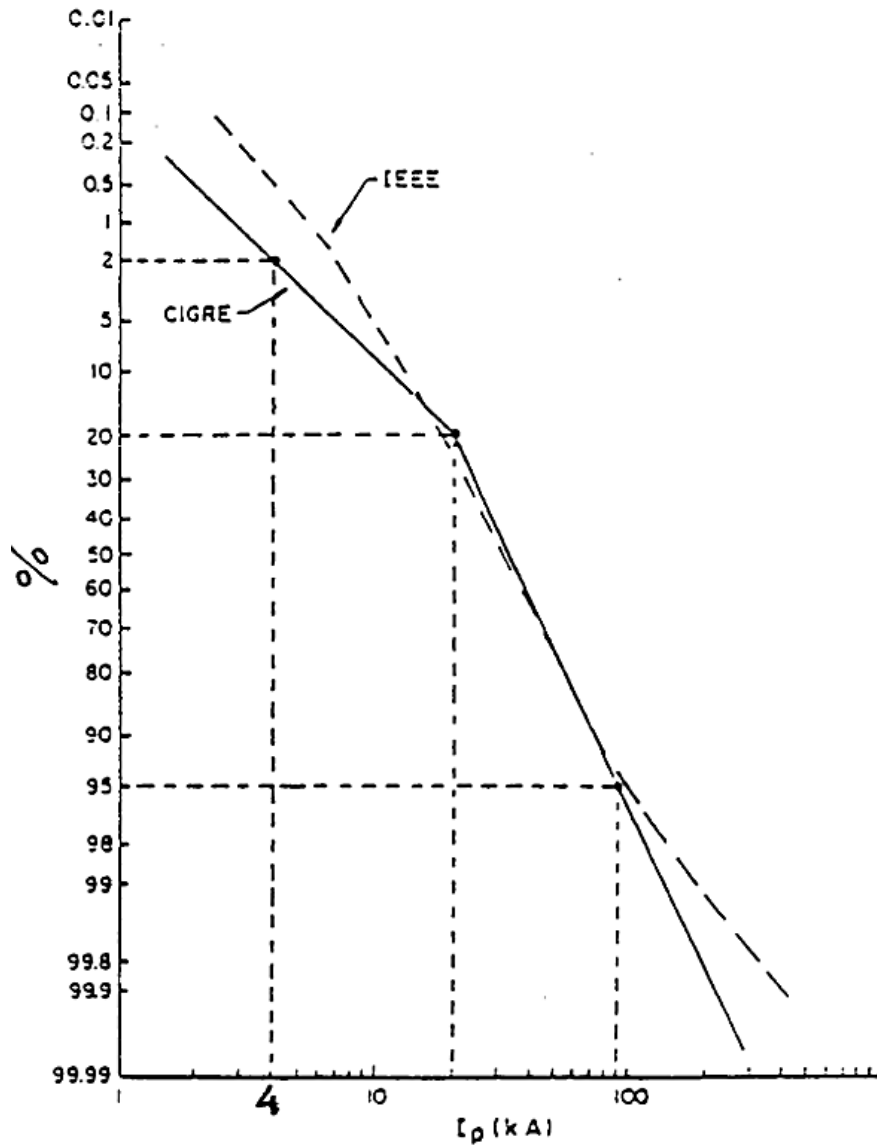


Figura 14. Porcentajes de que la I_{max} sea inferior al valor indicado. (El 2% de las primeras descargas de retorno negativas presentan intensidades de corrientes inferiores que 4 kA), adoptados por IEEE y CIGRE y se utiliza en varios estándares de protección contra rayos. (Adaptado de CIGRE 63, 1991).

A partir de las mediciones de corriente, se extraen otros parámetros, como la derivada de la máxima corriente, duración de la corriente, carga transferida o acción integral (energía específica). Esta información resumida a partir de las mediciones de corriente directa de 101 rayos CG descendentes negativos de Berger et al. (1975) en Suiza se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros de corriente del rayo para flashes negativos (Berger et al., 1972)

Parameters	Units	Sample Size	Percent Exceeding Tabulated Value		
			95%	50%	5%
<u>Peak current</u> (minimum 2 kA)	kA	101	14	30	80
First strokes		135	4.6	12	30
Subsequent strokes					
<u>Charge</u> (total charge)	C	93	1.1	5.2	24
First strokes		122	0.2	1.4	11
Subsequent strokes		94	1.3	7.5	40
Complete flash					
<u>Impulse charge</u> (excluding continuing current)	C	90	1.1	4.5	20
First strokes		117	.22	0.95	4
Subsequent strokes					
<u>Front duration</u> (2 kA to peak)	μ s	89	1.8	5.5	18
First strokes		118	.22	1.1	4.5
Subsequent strokes					
<u>Maximum di/dt</u>	kA/ μ s	92	5.5	12	32
First strokes		122	12	40	120
Subsequent strokes					
<u>Stroke duration</u> (2 kA to half peak value on the tail)	μ s	90	30	75	200
First strokes		115	6.5	32	140
Subsequent strokes					
<u>Action integral</u> (I^2dt)	A ² s	91	6.0×10^3	5.5×10^4	5.5×10^5
First strokes		88	5.5×10^2	6.0×10^3	5.2×10^4
Subsequent strokes					
Time interval between strokes	ms	133	7	33	150
<u>Flash duration</u>	ms	94	0.15	13	1100
All flashes		39	31	180	900
Excluding single-stroke flashes					

2.2 Sistemas de localización de rayos (LLS)

Los LLS son sistemas que se componen de múltiples estaciones a distancia para poder localizar rayos.

Existen diferentes técnicas de localización de rayos a distancia para conocer donde hay rayos. Por una parte, estos sistemas permiten observar las tormentas para mejorar la seguridad frente al rayo con la prevención y predicción, y, por otra, permiten tener información de si ha habido rayos para hacer mantenimiento de sistemas que han podido verse afectados por la caída de rayos, reconocer daños y proteger la actividad humana industrial. También permite hacer estudios del comportamiento de las tormentas y la densidad de rayos en el área donde se detectan rayos.

A continuación, se presentan distintos tipos de LLS clasificándolos a partir de los principios en los que se basan: detección de amplitud de campo eléctrico y magnético, detección de la dirección del campo magnético y otros sistemas. Es posible localizar un rayo con los campos eléctricos o magnéticos, a través de dos técnicas:

- Una basada en los cambios de campo electrostático que consiste en utilizar varias estaciones de medida de campo electrostático y encontrar los cambios en la distribución de carga provocados por un rayo.
- La otra basada en los picos de los campos de radiación eléctrica y magnética que suponen que los campos medidos son básicamente campos de radiación y que el pico del campo inicial del RS irradia

cerca del punto de contacto con el suelo. Con diferentes sensores se obtiene el campo eléctrico a distancia para el canal del rayo. Debido a que la Tierra no es un conductor perfecto, esta técnica se utiliza combinada con otras como la de encuentro de la dirección del campo magnético (*magnetic direction finding, MDF*) o los sistemas basados en el tiempo de llegada (*time of arrival, TOA*).

2.2.1 Detección electromagnética de rayos

La descarga de un rayo CG se produce en cientos de milisegundos. Está formada principalmente por: el líder escalonado (*stepped leader*), el proceso de unión del primer RS y las descargas subsecuentes, como se han descrito anteriormente, en el apartado 2.1.3. Cada uno de estos procesos están asociados con diferentes campos eléctricos y magnéticos que emiten energía desde menos de 1 Hz llegando a más de 300 MHz (Cummins et al., 1998). El RS es el proceso del rayo que emite la radiación electromagnética más potente tanto en baja frecuencia (LF) y muy baja frecuencia (VLF).

Los sensores de detección de rayos en satélites, desde el espacio (*space-based*), son sistemas de detección globales que monitorean rayos ICs y CGs desde un satélite orbital o estacionario capturando el transitorio óptico del rayo. En general, la detección de rayos en satélites es un sistema incapaz de distinguir el tipo de rayo (CG o IC). Pueden detectar las emisiones electromagnéticas de VHF (Christian et al., 1989). Tienen una amplia cobertura y una aceptable precisión de localización, de 1km o menos. Algunos ejemplos son el Lightning Imaging Sensor (LIS) y el Atmosphere-Space Interactions Monitor (ASIM) en la Estación Espacial Internacional (ISS), el Geostationary Lightning Mapper (GLM) en el satélite GOES-16 y 17 o el Lightning Imager en el satélite Meteosat Third Generation (MTG-LI). Según Montanyà et al. (2022), hay una nueva generación de este tipo de LLS que ofrece nuevas aplicaciones, como obtener la información total sobre rayos, hacer mapeos geográficos de la cobertura de las descargas, estudiar las dimensiones aproximadas de los rayos, la correlación de las energías derivadas de la luminosidad de la descargas con su corriente pico al igual que la identificación de rayos asociados con componente de corrientes continuas, etc.

Los sensores de detección de rayos basados en tierra (*ground-based*) utilizan varios sensores y su cobertura geográfica y resolución espacial dependerá del número de sensores, la distancia entre ellos, la técnica utilizada y la frecuencia en la que miden. Si el rango es LF, entre 30 y 300 kHz, VLF (3-30kHz) o VHF (30-300MHz), tal como se observa en la Figura 15

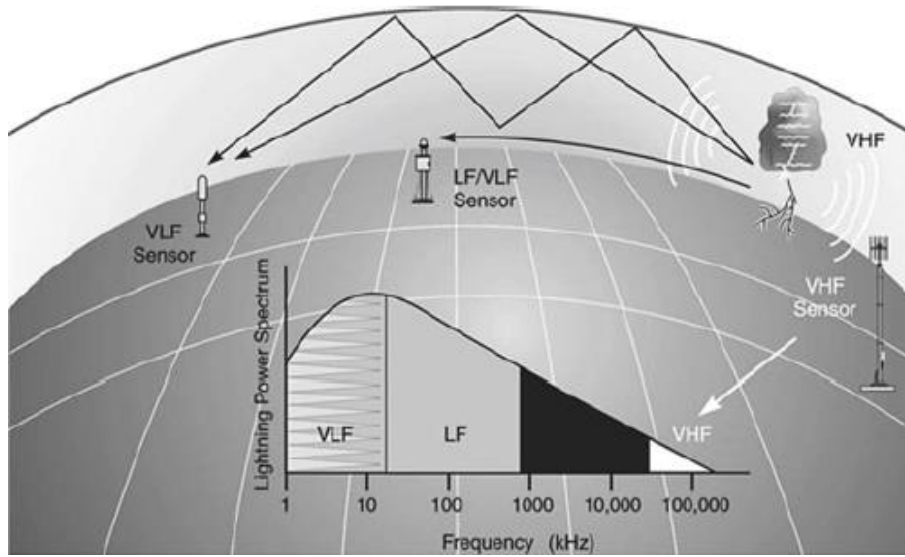


Figura 15. Técnicas de detección de rayos y frecuencias de operación (Cummins y Murphy, 2009).

Los tres tipos de técnicas de localización de rayos más comunes son:

1. Encuentro de la dirección del campo magnético (*MDF*)

Según la ley de Faraday, el voltaje (*V*) inducido en una espira circular en un campo magnético (*B*) depende de la variación en el tiempo (*t*) del flujo magnético inducido (Φ), según ecuación:

$$V = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

Es por eso que usando dos antenas de lazo verticales y ortogonales es posible obtener el origen de la fuente de campo magnético. Estas dos antenas siempre asumen que la radiación del campo eléctrico es vertical, por lo que el campo magnético es perpendicular (horizontal). Con dos estaciones de antenas de lazo, el error es grande, como mínimo se requieren tres (ver Figura 16). Esta técnica puede tener errores de localización causados por campos magnéticos no deseados, terreno montañoso u objetos conductores cercanos.

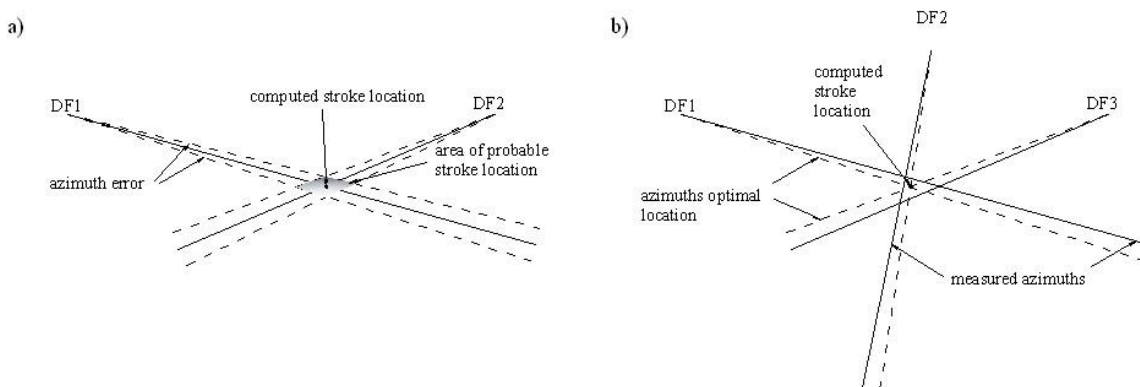


Figura 16. Determinación de la ubicación del impacto del rayo: a) con dos estaciones de antenas circulares (DF); b) con tres estaciones de antenas circulares (DF). (Adaptado de Rakov y Uman, 2003)

2. Tiempo de llegada (time of arrival-TOA)

El sensor de TOA determina el instante en que una parte de las señales electromagnéticas de los rayos llega al sensor.

Cada receptor produce un hiperboloide de posibles puntos desde donde podría ser el punto de impacto del rayo. En el caso de que haya dos receptores, obtenemos la dirección de la fuente con el acimut y la elevación. Con tres o más receptores es posible encontrar la ubicación del punto de intersección de dos o más vectores de dirección. (ver Figura 17).

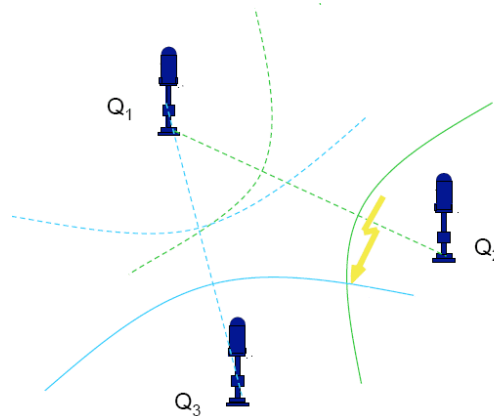


Figura 17. Localización de la caída del rayo con tres sensores de TOA. (Adaptado de Rubinstein, 2007)

Hay tres tipos:

- Los sistemas de línea de base (distancia entre sensores) muy corta: decenas a cientos de metros. Están formados por varios sensores TOA cuya distancia es corta en comparación con el tiempo entre pulsos (algunos microsegundos o cientos de microsegundos). Estos sistemas TOA operan en VHF, de 30 a 300 MHz.
- Los sistemas de línea de base corta: decenas de kilómetros. Operan en VHF, de 30 a 300 MHz, como los de línea de base muy corta. Se utilizan para estudiar el desarrollo espacial y temporal de las descargas porque proporcionan imágenes de los canales de rayos.
- Los sistemas de línea de base larga: decenas a cientos de metros. Operan en VLF y LF, de 3 a 300 kHz, y se utilizan para identificar la ubicación del punto de impacto del rayo en el suelo.

3. Interferometría

Un interferómetro de rayos suele estar compuesto por dos o más antenas separadas unos pocos metros y conectadas por el mismo filtro de banda estrecha y receptor. La diferencia de fase entre dos señales casi sinusoidales de los dos receptores se convierte luego en un voltaje mediante un detector de fase. Se necesitan tres o más antenas para formar dos o más líneas de base ortogonales a fin de obtener el acimut y la elevación de una fuente de radiación. Estos sistemas suelen operar en bandas de frecuencia muy estrechas dentro de la banda VHF (30~300 MHz)/UHF (frecuencia ultra alta, 300 MHz~3 GHz). Estos sistemas tienen una alta sensibilidad a la señal, pero también una relación señal/ruido

relativamente baja debido a la alta frecuencia de trabajo y la poca distancia entre antenas. (Adaptado de CIGRE TB 549, 2013).

2.2.2 Otros sistemas

Existen otros sistemas de medida de rayos:

1. Geolocalización de “resonancia Schumann”

Rayos a una distancia de más de 100 km pueden excitar las llamadas intensidades de resonancia de Schumann, que son 10-100 veces el nivel de la actividad de rayos de fondo y se pueden localizar desde una sola estación receptora dotada con sensores para medir el campo eléctrico vertical y el campo magnético horizontal. Sólo se pueden medir algunos rayos particulares con este método.

2. Contadores de rayos

Son instrumentos basados en una antena que registran pulsos de campo eléctrico o magnético del rayo.

2.2.3 Variables derivadas de los sistemas LLS: número y agrupación de descargas

Un *stroke* al final se trata de un impulso de corriente que genera campos electromagnéticos detectados por los LLS. Estos impulsos pueden ser durante: 1) inicio de la descarga (típicamente en las nubes), 2) durante descargas de retorno (RS), 3) cuando se reportan descargas subsecuentes y 4) durante múltiples impactos a tierra. Todos estos procesos se agrupan dentro de un mismo rayo que se le conoce como *flash*. A partir de los *flashes* se derivan múltiples variables de uso en investigación e ingeniería, como es el caso de la densidad de rayos a tierra.

Entre un tercio y la mitad de los rayos (CIGRE TB 549, 2013) producen múltiples ramificaciones que impactan con tierra, por lo que el número de puntos de impacto al suelo es mayor que el número de *flashes*. Para tener en cuenta estas terminaciones múltiples del canal del rayo, la corrección es entre 1.5 (mediciones en Francia por Hermant, 2000) y 1.7 (mediciones en Arizona y Brasil por Saraiva et al., 2010, mediciones en Florida por Rakov y Uman, 1990).



Figura 18. Rayo CG con múltiples ramificaciones y un contacto a tierra. (Adaptado de Lightning Research Group, UPC).

2.2.4 Corriente de pico a partir del campo electromagnético

Existen varias aproximaciones ecuaciones en la literatura para la estimación de la corriente del rayo a partir del campo electromagnético, que se resumen en el estudio de Rachidi y Tothappillil (1993), y que son la base a partir de la cual algunos LLS estiman la corriente de pico asociada al rayo.

Rakov et al. (1992) a partir de datos de rayos provocados por cohetes (*triggered-lightning*) en el Kenedy Space Center de Florida (Estados Unidos), propusieron la siguiente formula empírica para estimar la corriente de pico de las descargas de retorno negativas:

$$I_{EF} = 1.5 - 0.037 \cdot r \cdot E \quad (1)$$

Donde I_{EF} es la corriente de la RS en kA, E es el campo eléctrico inicial en V/m y r la distancia de la observación al canal del rayo en km.

Uman y McLain (1969) indican que uno de estos modelos es el modelo línea de transmisión, a través de la siguiente expresión que determina la intensidad de pico a partir del campo eléctrico máximo:

$$I = 2\pi\epsilon_0 c^2 r \frac{E}{v} \quad (2)$$

Donde la corriente de pico del RS (I) está relacionada con el campo eléctrico máximo (E) y con la velocidad del RS (v), asumiendo que esta velocidad es constante, que el suelo es perfectamente conductor y que el frente del RS no ha llegado a lo más alto del canal del rayo. Otras variables de esta ecuación son: ϵ_0 , que es la permitividad en el vacío, y c , la velocidad de la luz.

Rachidi et al. (2004) también destacan que debido a la gran variabilidad de parámetros clave como la velocidad del RS, es imposible determinar la corriente del rayo con precisión a partir de la corriente eléctrica medida remotamente o a partir del campo magnético para un evento dado.

Los sistemas de localización de rayos se calibran con las medidas de corriente que se obtienen con medidas directas por ejemplo en torres instrumentalizadas de medida de corrientes de rayos. Por ejemplo, CIGRE TB 549 (2013) indica que el procedimiento de conversión de campo a corriente empleado por la Red Nacional de Detección de Rayos (NLDN) de EE. UU. y otros sistemas similares de localización de rayos se ha calibrado solo para descargas posteriores negativas, con un error absoluto medio del 10 al 20 %.

2.2.5 Densidad de rayos

Una de las aplicaciones de los LLS es la obtención de mapas de densidad de rayos CG (*ground flash density - GFD*). Según la normativa IEC 62858-2019, la GFD (o N_G) es el número de *flashes* por unidad de área y tiempo ($flashes \times km^{-2} \times año^{-1}$).

Los LLS son la mejor herramienta que existe actualmente para hacer mapas de densidad de rayos, a pesar de que tienen algunas limitaciones que se han que tener en cuenta, según CIGRE TB 549 (2013):

- No detectan rayos CG de baja intensidad, especialmente en la periferia de la red.
- Fallan en la discriminación de algunos rayos IC (también en Cummins y Murphy, 2009; San Segundo et al., 2020).
- La precisión y detección total dependen de la configuración de la red, la ganancia del sensor del sistema y el umbral de detección, los criterios de selección de la forma de onda del sensor, los parámetros del rayo y las condiciones de propagación del campo electromagnético.

Es importante tener en cuenta que para el cálculo de la densidad de rayos se necesitan *flashes* y, como los sistemas de localización de rayos detectan descargas (*strokes*), se tienen que agrupar y el resultado de la GFD dependerá del método utilizado para agruparlos. En esta tesis se utilizará el criterio de agrupación descrita en la normativa IEC 62858-2019, basado en una ventana espacio temporal y que agrupa una descarga subsecuente con la primera RS para formar un *flash* si:

- a) La descarga se produce en menos o igual a 1 s después de la primera RS;
- b) la ubicación de la descarga es menor o igual a 10 km desde la primera RS;
- c) el intervalo de tiempo entre descargas subsecuentes es menor o igual a 500 ms.

Basados en los sistemas de detección de rayos desde el espacio, en la Figura 19, se muestra la variable densidad de rayos, utilizando los instrumentos LIS y Optical Transient Detector (OTD), a nivel global. Cada punto cuantifica la cantidad de rayos (*flashes*) en la celda. Se observa que el Lago Maracaibo es el punto con más rayos del planeta, con una densidad de rayos media de 389 *flashes* por día y Kuala Lumpur como capital nacional con más densidad de rayos (Peterson et al., 2021).

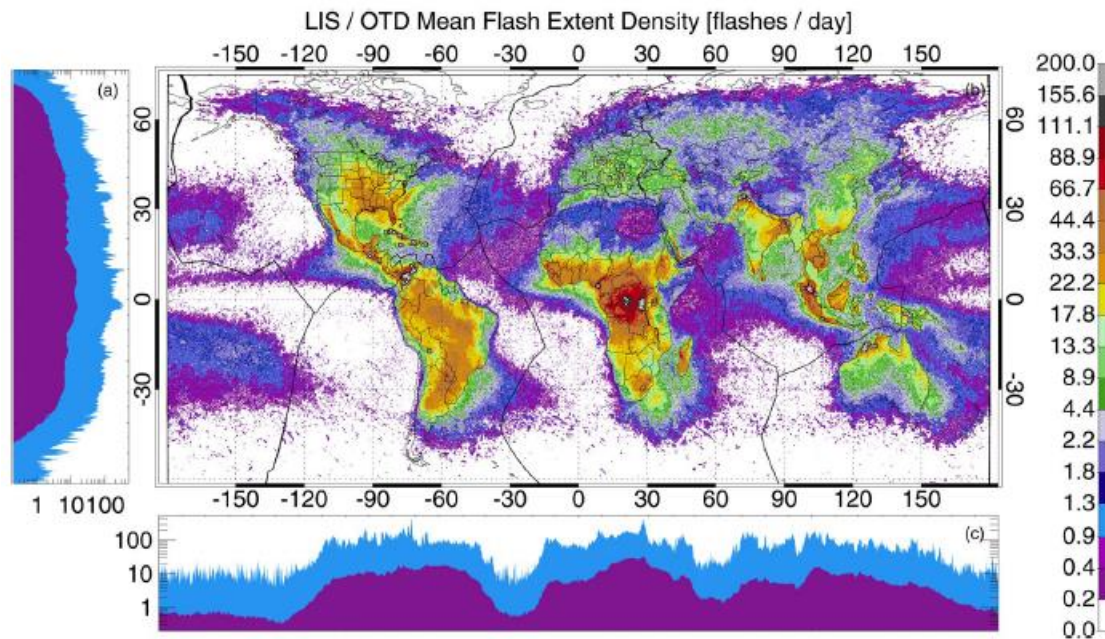


Figura 19. Distribución del número medio de rayos anual de LIS/OTD con cuadrícula de 10 km. A la izda. Y debajo del mapa, la media (lila) y máxima (azul) para cada latitud (a) y longitud(c). (Adaptado de Peterson et al., 2021).

2.3 Rayos en estructuras elevadas

Las estructuras verticales elevadas, como pueden ser aerogeneradores o torres de telecomunicación, concentran gradientes de potencial eléctricos elevados, en especial durante tormentas eléctricas, en la parte superior por su cercanía a las nubes de tormenta. En estas extremidades se suelen iniciar líderes ascendentes que pueden completar el proceso de una descarga eléctrica atmosférica. Este tipo de descargas se conocen como *upward lightning* o descargas ascendentes. Estas descargas ascendentes son muy típicas en tormentas de invierno, en donde la base de las nubes de tormentas están más cerca de la superficie de la tierra, por lo que hace más factible el incremento del campo eléctrico en estructuras elevadas, ayudando a que se produzca estos líderes ascendentes que al final terminan produciendo una descarga de este mismo estilo, ascendente. Más adelante, en la Figura 22, se muestra un mapa global de descargas de invierno, que se asocian con este tipo de rayos ascendentes.

También las estructuras elevadas pueden ser la conexión de líderes descendentes de la nube que gracias a estas estructuras elevadas encuentran la conexión para que empiece la descarga de un rayo a tierra.

Hay zonas del planeta, como el caso de regiones tropicales, en el que las descargas ascendentes no son tan comunes incluso en las condiciones más propicias, como es el caso de estructuras elevadas. Esto debido a que hay más distancia entre la base de la nube de tormenta y la estructura en tierra. Generalmente, en regiones tropicales las estructuras elevadas interactúan con las tormentas eléctricas mediante el impacto de rayos descendentes con una elevada intensidad de corrientes, como se registra en torres instrumentizadas de impactos directos, como en Visacro et al. (2007).

Incrementando la altura de una estructura, se observa un incremento del número de descargas de rayos con un incremento en el porcentaje de rayos ascendentes (CIGRE TB 549, 2013, Zhou et al., 2010). Las torres altas son el objeto preferente de instrumentación para la medida directa de corrientes de rayos, como ejemplo las de la Figura 20.



Figura 20. Torres instrumentalizadas para medida de rayos. a) Niu de l'Àliga, Alp (España) (LRG, UPC). b) Torre CN, Toronto (Canada). (© Philip Oldfield)

En las estructuras altas, aparte de que producen sus propios rayos, también las corrientes de los rayos y sus campos electromagnéticos asociados se ven afectados por la estructura (Rakov 2001, Rachidi 2007). Entonces, el problema de la protección contra rayos y la compatibilidad electromagnética (EMC) de esas estructuras debe abordarse mediante la inclusión de los efectos descritos.

Como estructuras altas se consideran las que miden más de 100 m. Sin embargo, estructuras no tan altas pero ubicadas en sitios muy expuestos podrían experimentar una actividad de rayos similar.

Eriksson (1987) a partir de sus observaciones, propuso la siguiente expresión para determinar la actividad total de rayos en una estructura:

$$N = 24 \cdot 10^{-6} \cdot h_s^{2.05} \cdot N_g \quad (2)$$

Donde N es el número total de rayos (*flashes*) en una estructura alta por año, y h_s es la altura efectiva (m) de la estructura. La altura efectiva es la altura que tendría la estructura situada en una determinada zona con densidad N_g y que experimenta N rayos. Entonces, el problema de este método es que h_s no corresponde a la altura física de la estructura y debe ser determinada de forma experimental.

Zhou et al. (2010) propusieron un método para estimar la altura efectiva basada en un modelo que tenía en cuenta la geometría general (estructura más la montaña), la distribución del campo eléctrico alrededor del pico de la montaña y el criterio de principio de rayo ascendente propuesto por Rizk (1990), y a este criterio lo llamaron el "Rizk model method". Según este modelo se calcularon algunas alturas efectivas de torres (ver

Tabla 4), recogidos por Rakov (2011) en CIGRE TB 549 (2013) y se puede ver que la altura efectiva es siempre superior a la altura física de la torre.

Tabla 4. Estimación de la altura efectiva de algunas torres instrumentalizadas. (Adaptado de CIGRE TB 549, 2013)

Objeto	Localización	Altura (m)	Terreno	Altura efectiva (m)
2 torres separadas 400 m entre si	Monte San Salvatore, Lugano (Suiza)	70	640 m sobre lago lugano 912 m sobre nivel del mar	270, 350, 198
Torre CN	Toronto (Canada)	553	Llano	553
Torre Cachimbo	Brasil	60	Montaña de 200 m respecto terreno de alrededor 1600 m sobre nivel del mar	145
Torre Gaisberg	Salsburgo (Austria)	100	Montaña de 1287 m sobre nivel del mar	274

2.3.1 Influencia estacionalidad: rayos de invierno

Las tormentas de fuerte convección son las que más rayos CG descargan. En la zona de la Península Ibérica, estas tormentas ocurren mayoritariamente en las estaciones cálidas y los rayos son predominantemente de polaridad negativa, de acuerdo a la climatología de los rayos (Rivas Soriano et al. 2005).

Hay condiciones en invierno que, aunque no haya condiciones de convección profunda, favorecen los rayos a tierra que pueden dañar las estructuras elevadas. Las nubes de tormenta se encuentran más bajas (Figura 21) por lo que el campo eléctrico que generan queda más cerca de las estructuras elevadas, si además la topografía provoca una altura efectiva mayor de estas estructuras, se favorece la iniciación de líderes en estas estructuras que pueden desencadenar una descarga de rayo. (Montanyà et al.,2007). Este tipo de rayos aunque son menos frecuentes, pueden ser muy energéticos y producir daños en estructuras elevadas (Zhou et al., 2012a; Yokoyama et al., 2014).

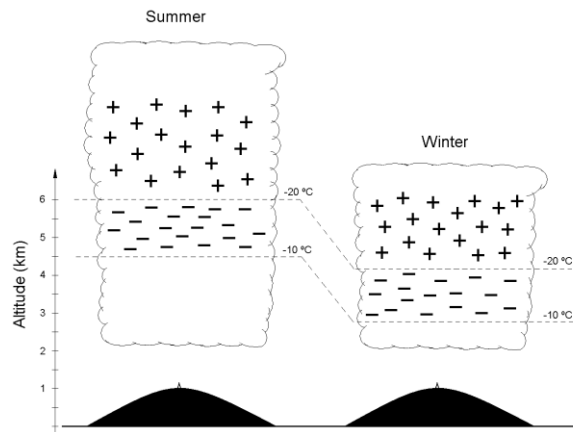


Figura 21. Estructura de las nubes en verano e invierno en torre elevada. (Montanyà et al., 2007)

En el artículo de Montanyà et al. (2016) se calcularon mapas globales de actividad eléctrica atmosférica en periodos de invierno (Figura 22) para mejorar el cálculo de riesgo de rayos en estructuras elevadas. Es posible que estén relacionados con sitios de recurrencia de rayos, tratados en el capítulo 5 de esta tesis.

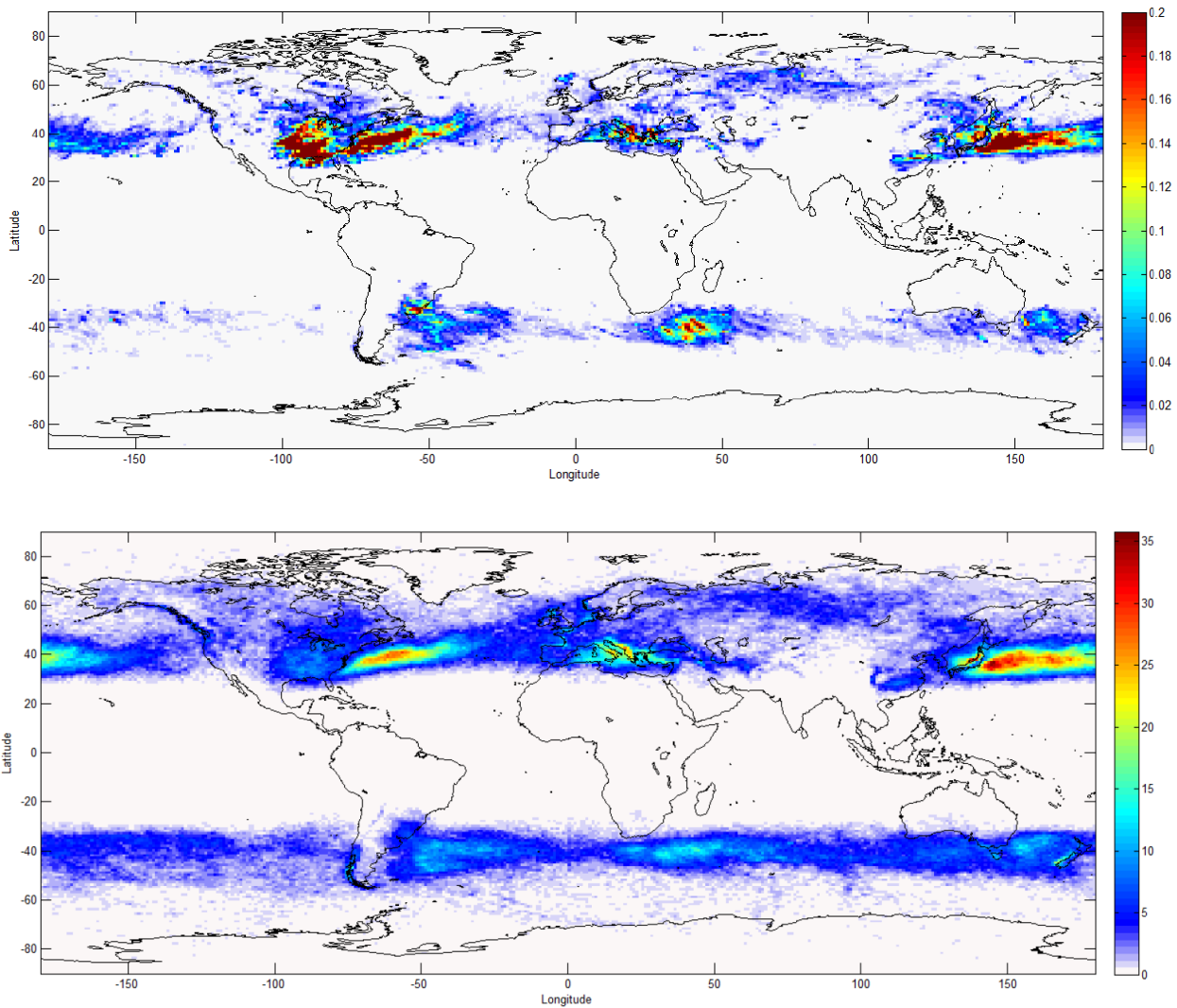


Figura 22. Mapa de distribución global de rayos de invierno ($\text{strokes-km}^2\text{-year}^{-1}$) para el periodo 2009-2013 (mapa superior). Mapa de la media de días de tormentas por año en el mismo periodo (mapa inferior). (Montanyà et al., 2016).

2.3.2 Características de los rayos en estructuras elevadas

Las descargas negativas ascendentes (Figura 6.b) son iniciadas por líderes positivos ascendentes desde la parte superior de estructuras elevadas. Las descargas de rayos negativas iniciadas por estructuras elevadas siempre involucran una etapa inicial (*initial stage, IS*) que puede o no ser seguida por secuencias de descarga de retorno (*RS sequences*) y por líderes descendentes o ascendentes. Estas últimas son similares a las secuencias de RS subsecuentes en rayos descendentes naturales (CIGRE TB 549, 2013).

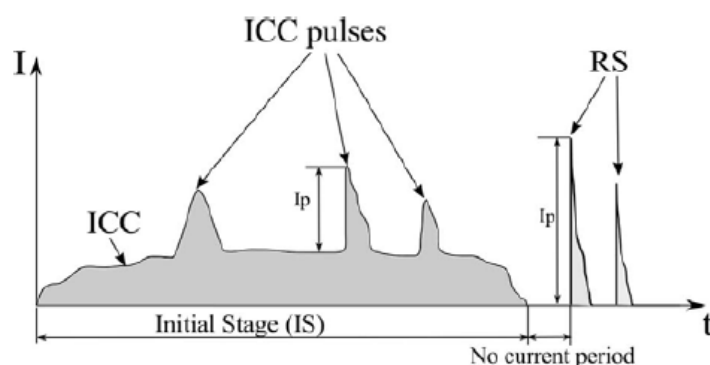


Figura 23. Medida de un rayo ascendente iniciado por una torre elevada. ICC son las corrientes continuas iniciales con 3 pulsos superpuestos ICC, un periodo sin flujo de corriente y dos descargas de retorno (RS). (Adaptado de Diendorfer et al., 2019).

La corriente continua inicial a menudo presenta pulsos superpuestos que van de unas decenas de amperios a algunos kiloamperios. Algunas características de valores medios en la fase inicial del rayo ascendentes se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Características (valores medios) de la fase inicial de los rayos ascendentes negativos (Adaptado de CIGRE TB 549, 2013).

Data Set	Sample Size	Duration, (ms)	Charge Transfer, (C)	Average Current, (A)	Action Integral, ($10^3, A^2s$)
Peissenberg Tower, Germany	21	290	38.5	133	3.5
Fukui Chimney, Japan	36	>82.5	>38.3 (>36.8)	465	40 (34)
Gaisberg Tower, Austria (2000)	74	231	29.1	126	1.5
Gaisberg Tower, Austria (2000-2007)	457	266 (N=431)	33	113 (N=431)	7.0

En Diendorfer et al. (2009) analizaron tres categorías de descargas ascendentes:

- ICC_{RS}: ICC es seguido por una o más RS,

- ICC_P: al ICC no le sigue ninguna RS pero tiene uno o más pulsos ICC > 2 kA
- ICC_{Only}: al ICC no le sigue ninguna RS y no se produjo ningún pulso ICC > 2 kA.

Para las descargas del tipo ICC_P, la media geométrica de la carga transferida de 69 C es más de tres veces mayor que los 21 C determinados para los *flashes* ICC_{Only}.

En el caso de descargas ascendentes positivas (Figura 6.d) son iniciadas por líderes negativos ascendentes desde la parte superior de estructuras elevadas. Las características de corriente se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Características (valores medios) de la fase inicial de los rayos ascendentes positivos (Adaptado de CIGRE TB 549, 2013).

Data Set	Sample Size	Magnitude (A)	Duration (µs)	Risetime (µs)	Half-Peak Width (µs)
Fukui Chimney, Japan	231	781	514	44.2	141
Peisenberg Tower, Germany	124	512	833	60.9	153
Gaisberg Tower, Austria	348-377	> 377 (N=351)	1199 (N=377)	<110 (N=344)	276 (N=348)

El porcentaje de rayos ascendentes positivos P. ej. en la Gaisberg Tower los rayos ascendentes positivos representaron un 4%, según Zhou et al. (2012b)

La RS es similar a un rayo natural CG y las medias de corriente están sobre los 10 kA de media (CIGRE TB 549, 2013). En la Figura 24 se puede ver un registro de RS de rayo ascendente.

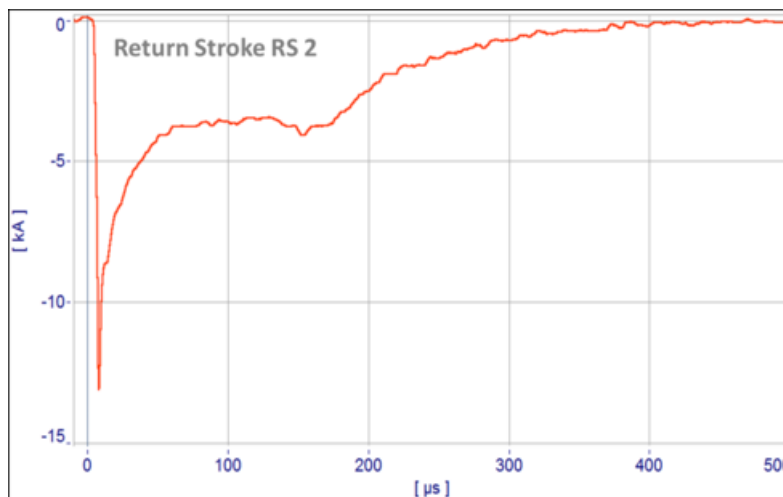


Figura 24. Forma de onda de la corriente de una RS después de la fase ICC en un rayo ascendente positivo. (Adaptado de Aldis, 2023).

2.4 Megaflashes y superbolts

Un tipo de rayos que ocurren de forma extraordinaria son los llamados *megaflashes* y los *superbolts*.

Los *megaflashes* son rayos cuya extensión supera los 100 km. Según Peterson et al. (2022), no ocurren en tormentas ordinarias, pues necesitan nubes electrificadas expansivas que descarguen a bajo ritmo para que un único *flash* horizontal pueda recorrer distancias extraordinarias. Sólo algunos *overhanging anvils* y lluvias en regiones estratiformes en sistemas convectivos de mesoescala cumplen las condiciones idóneas para que estos eventos sucedan. En este artículo se describen los dos *megaflashes* récord que se han detectado:

- Récord en duración: 17,10 s, detectado el 20 de junio e 2020 en la zona de la frontera entre Argentina y Uruguay.
- Récord en distancia: 768 km, entre Texas y Missisipi (EE. UU.) el 29 de abril de 2020.

Los *superbolts* son los rayos más potentes que se detectan. Turman (1977) fue el primero en encontrar unas 20 descargas que clasificó como *superbolts* a partir de datos de rayos obtenidos con un sistema óptico. Holzworth et al. (2019) los definen como las descargas de rayo con una energía de tres órdenes de magnitud superior a la energía media de una descarga, es decir, *strokes* que transfieran más de 10^6 J. Los datos analizados son a partir de la red de detección de rayos de VLF World Wide Lightning Location Network (WWLLN), a con la energía media por *stroke* y no con el pico de potencia, como en un sistema óptico.

En Holzworth et al. (2019), sólo en algunos casos pudieron verificar los datos de rayos con el LLS Earth Networks Total Lightning Network (ENTLN), pues en la mayoría de zonas no tenía cobertura. En la Figura 25 se muestra una distribución de corrientes de estos casos coincidentes entre las dos redes y observaron que la corriente de pico media de los *superbolts* negativos coincidentes es -267 kA. En esta figura se muestra que son menos los rayos positivos coincidentes, aun así presentan corrientes significativamente altas.

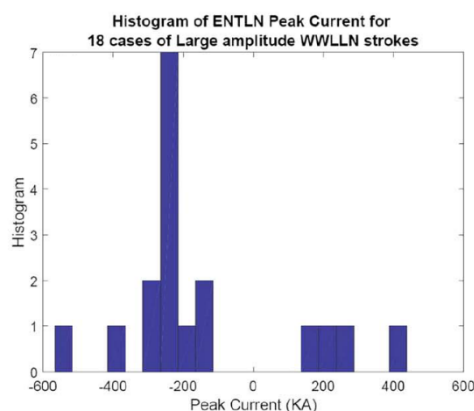


Figura 25. Corrientes de pico de ENTLN para 18 casos de flashes encontrados con WWLLN coincidentes con los superbolts, todos ellos en EE. UU. (Adaptado de Holzworth et al., 2019).

Holzworth et al. (2019) indican que los *superbolts* ocurren mucho más sobre océanos y mares y más a menudo en invierno.

Ripoll et al. (2021) observaron que, desde el espacio las señales electromagnéticas de los *superbolts* se reciben con ondas de VLF entre 10 y 10^4 más potentes que una descarga de rayo típica. En Europa utilizan desde tierra el LLS de Météorage, sistema de VHF/LF, y de la campaña ECLAIR, que miden campos eléctricos VLF a alta frecuencia; HF con antenas de dipolo vertical, y desde el espacio con el satélite Van Allen Probes de la NASA. En el mapa de la Figura 26, se observan diferentes *superbolts* detectados con estos sistemas y los coincidentes entre ellos. Se destaca que muchos son en superficie oceánica o marítima, concretamente bastantes en el Mar Mediterráneo, y algunos en la Península Ibérica, que coinciden con zonas de estudio de esta tesis.

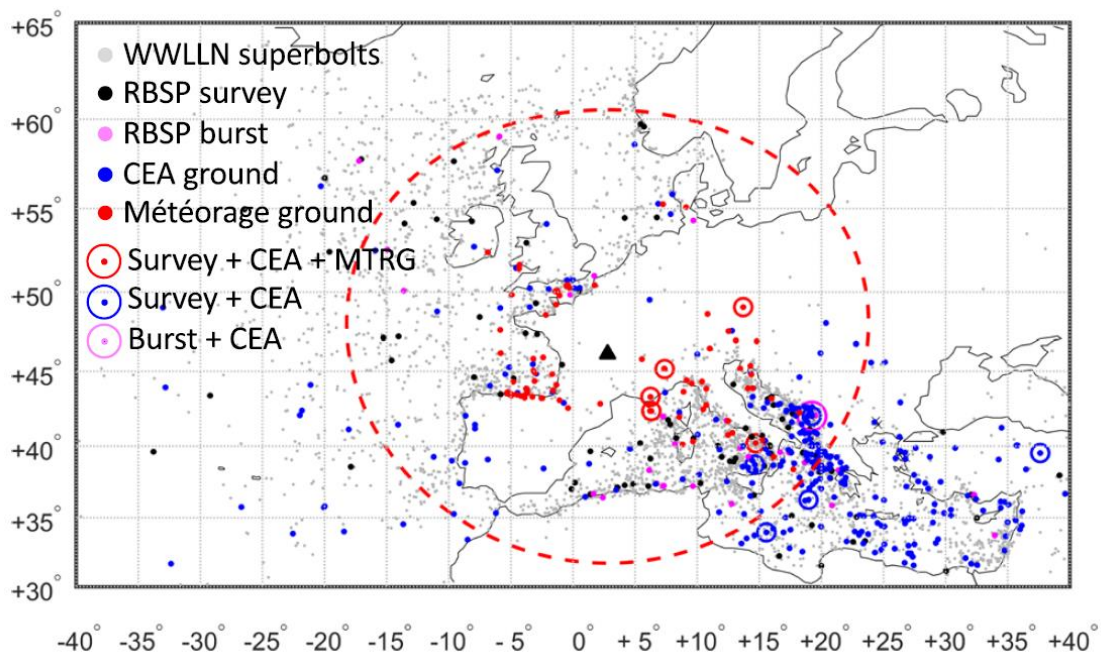


Figura 26. Mapa de Superbolts detectados en Europa (círculos grises) detectados por WWLLN entre 2012 y 2018, entre los que destacan los medidos por Van Allen Probes en los modos de survey (círculos negros) y de burst (círculos rosas). Superbolts WWLLN vistos en coincidencia (círculos azules), ECLAIR (círculos rojos) mediciones terrestres de ECLAIR y Météorage. (círculos rosas grandes) Observaciones sincronizadas desde el espacio y la tierra con WWLLN, sondas Van Allen y ECLAIR. El círculo rojo discontinuo define un radio de 1500 km centrado en el triángulo negro que indica la ubicación de una de las estaciones ECLAIR utilizadas aquí. Los ejes x e y son la longitud y la latitud, respectivamente. (Adaptado de Ripoll et al., 2021).

3 Trabajo experimental: instalación y mantenimiento Red LINET en España y Portugal

En este capítulo se presenta la instalación de la red de detección de rayos en la Península Ibérica, que contribuye a completar la red Europea LINET y crear una base de datos de rayos que se utilizan en el resto de capítulos de esta tesis.

3.1 Red de detección de rayos LINET

3.1.1 Origen

En 1994, el grupo de investigación dirigido por el Prof. Hans Dieter Betz de la Universidad de Múnich (Alemania), desarrolló un tipo de sensor VLF/LF para detectar rayos en áreas extensas (Betz et al., 2009a). El conjunto de estos sensores más adelante formaría la red LINET (**L**ightning **D**etection **N**ETwork). Desde 2002, estos sensores son fabricados por la empresa nowcast GmbH (nowcast en adelante) y prácticamente toda la red se opera desde allí. Actualmente LINET está presente en la mayoría de países europeos (Figura 27) y en varios países del mundo, incluidos Estados Unidos, Australia y regiones de sur América como Colombia y Perú.



Figura 27. Sensores de la Red Linet en Europa en 2012. (Adaptada de Keraunos, 2016).

3.1.2 Diseño de la Red LINET y principio de detección

Un sensor LINET está formado por dos antenas circulares dispuestas ortogonalmente, que miden el campo magnético en el rango de frecuencia de 1 a 200 kHz. Dispone de un GPS que registra la señal de tiempo con precisión inferior a 100 ns. Junto a las antenas y el GPS, hay un dispositivo que es amplificador de la señal, filtro y convertidor de analógico a digital. Separadamente hay una unidad que procesa y envía la señal al procesador central. Para cada rayo detectado se hace un rápido análisis de Fourier y análisis de coincidencia de tiempo para discriminar señales y eliminar ruido (Betz et al., 2009a). El sistema de detección combina el método TOA y MDF.

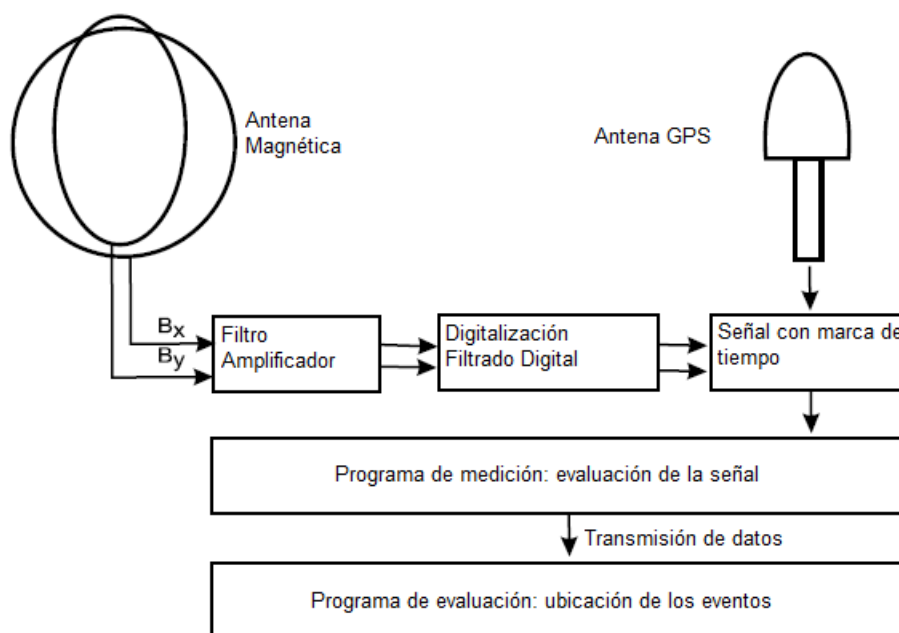


Figura 28. Esquema de la configuración del sistema de medición de un sensor LINET. (Adaptado de Schmidt, 2007).

Según Schmidt (2007), las dos entradas de campo magnético procedentes de la antena y la información de tiempo del GPS se procesan en una tarjeta de medición, conectada a un ordenador de medición a través del puerto USB. El reloj de 10 MHz del receptor GPS marca la frecuencia base para la tarjeta de medición, que necesita una sincronización muy precisa de los registros. Para procesar continuamente, sin tiempos muertos, a intervalos de regulares (1 s aproximadamente), se hace un control de seguridad para comprobar que el programa de medición funciona correctamente. En cada estación se establece un umbral de medición para identificar a partir de qué señal se evalúa y así eliminar las pequeñas fuentes de interferencia que pueda haber localmente. Si una señal supera el valor umbral, se abre una ventana de tiempo con 512 valores (correspondiente a 512 μ s). Esta ventana de tiempo contiene un disparo previo de 50 μ s de duración antes del valor medido de disparo, de modo que la señal se pueda analizar de la forma más completa posible. En la estación, se procesan, almacenan y envían 100 señales por segundo durante el procedimiento de evaluación a la computadora central. Si se producen señales más altas, se trata principalmente de interferencia local y no de

rayos reales. Para los algoritmos de procesamiento de la señal únicamente se necesita: (1) la información de tiempo en un punto destacado de la señal, (2) el ángulo de incidencia de la onda entrante y (3) la amplitud de la señal medida, descritos a continuación.

1. **Información de tiempo:** es necesario mantener el mínimo error de tiempo de la señal individual para poder calcular el punto de origen de la onda electromagnética con mayor precisión. El error de tiempo de cada valor de muestra individual es tan grande como el error del tiempo del GPS medido cada segundo (según las especificaciones del fabricante: 100 ns). Sin embargo, la distancia entre dos puntos de medición es de $1 \mu\text{s}$ (tiempo de muestreo). Se determina el tiempo del máximo valor de la onda entrante con la mayor precisión posible.
2. **Ángulo de incidencia (α):** resulta de la relación de las dos componentes de la inducción magnética medidos (en las dos direcciones: B_x y B_y):

$$\tan \alpha = \frac{B_x}{B_y} \quad (1)$$

Alrededor del máximo, se promedia un gran número de valores medidos.

3. **Amplitud de la señal:** se calcula el punto máximo del campo magnético (B_{max}) con los máximos de los componentes de la inducción magnética (en las dos direcciones: $B_x(t_{Bmax})$ y $B_y(t_{Bmax})$, donde t_{Bmax} es el instante en que se produce este campo máximo):

$$B_{max} = \sqrt{B_x^2(t_{Bmax}) + B_y^2(t_{Bmax})} \quad (2)$$

Este valor es el que se utiliza para determinar la corriente máxima.

Schmidt (2007) explica los dos métodos analíticos que sirvieron de punto de partida para el algoritmo posterior del sistema. El primero solo tiene en cuenta los ángulos de orientación de todas las estaciones, el segundo solo los tiempos de llegada de tres estaciones seleccionadas, por lo que generalmente se utilizan las tres más cercanas al rayo. Los dos métodos consideran una superficie esférica y fueron introducidos en el apartado 2.2.2 de esta tesis.

1) Encuentro de la dirección del campo magnético (MDF)

Schmidt (2007) indica que este método fue presentado en Orville Jr (1987). El origen del rayo se determina a partir de conocer la posición (coordenadas) de como mínimo cuatro estaciones y los respectivos ángulos medidos de incidencia de la señal, ya que este método sólo tiene en cuenta los ángulos de orientación de las estaciones más cercanas. Si se dibujan las líneas de dirección, rara vez pasan exactamente por la localización del rayo, por lo que se utiliza la distancia esférica más corta, entre la línea de dirección respectiva y la ubicación de la fuente, y se minimiza la suma de todos los cuadrados de las distancias. Sin

embargo, el paso más importante es la transferencia posterior a un problema de valor propio equivalente, que se resuelve analíticamente. Las coordenadas de rayos obtenidas con ello corresponden al mínimo global. La solución de este método se presenta a continuación, siendo las ubicaciones de las estaciones (longitud: λ_i , latitud: Φ_i) y el ángulo de incidencia asociado θ_i , y las distancias (x_i, y_i, z_i) :

$$\begin{aligned} x_i &= \sin \lambda_i \cos \theta_i & - & \sin \phi_i \cos \lambda_i \sin \theta_i \\ y_i &= -\sin \lambda_i \sin \phi_i \sin \theta_i & - & \cos \lambda_i \cos \theta_i \\ z_i &= \sin \phi_i \sin \theta_i \end{aligned} \quad (3)$$

Para un número N de estaciones, se calculan las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= \sum_{i=1}^N x_i^2 & \sigma_{yy} &= \sum_{i=1}^N y_i^2 & \sigma_{zz} &= \sum_{i=1}^N z_i^2 \\ \sigma_{xy} &= \sum_{i=1}^N x_i y_i & \sigma_{xz} &= \sum_{i=1}^N x_i z_i & \sigma_{yz} &= \sum_{i=1}^N y_i z_i \end{aligned} \quad (4)$$

A partir de estos valores, se encuentran las componentes e_x , e_y , e_z y e_r :

$$\begin{aligned} e_x &= \frac{\sigma_{xy}\sigma_{yz}}{\sigma_{xy}\sigma_{yz}} & - & \frac{\sigma_{xz}(\sigma_{yy} - \lambda^*)}{\sigma_{xy}\sigma_{yz}} \\ e_y &= \frac{\sigma_{xy}\sigma_{xz}}{\sigma_{xy}\sigma_{xz}} & - & \frac{\sigma_{yz}(\sigma_{xx} - \lambda^*)}{\sigma_{xy}\sigma_{xz}} \\ e_z &= \frac{(\sigma_{xx} - \lambda^*)(\sigma_{yy} - \lambda^*)}{\sigma_{xy}\sigma_{xz}} & - & \frac{\sigma_{xy}\sigma_{yz}}{\sigma_{xy}\sigma_{xz}} \\ e_r &= \sqrt{e_x^2 + e_y^2 + e_z^2} \end{aligned} \quad (5)$$

Donde λ^* es el valor propio más pequeño de la ecuación de valores propios descrita en Orville (1987) y utilizada en Schmidt (2007).

A partir de las componentes e_x , e_y , e_z y e_r , se determina la localización del rayo en coordenadas esféricas (A, Φ) , a partir de las siguientes expresiones:

$$\Lambda = a \sin\left(\frac{e_z}{e_r}\right), \quad \Phi = a \tan\left(\frac{e_y}{e_x}\right) \quad (6)$$

2) TOA

En este método sólo se tienen en cuenta los tiempos de llegada a las estaciones más cercanas. Schmidt (2007) expone las ecuaciones para encontrar el punto de intersección hiperbólicos a partir de los tiempos de llegada de tres estaciones, que se resumen en este apartado.

A partir de una lista ordenada de tiempos de llegada del campo magnético a cada estación, se puede determinar qué estación está más cerca del evento del rayo. La estación más cercana, con el tiempo de llegada más corto, es la estación base S1, la estación con el tiempo medio de llegada es S2 y la estación con el tiempo más amplio es S3.

Se utilizan los siguientes valores auxiliares:

$$\begin{aligned} x_{01} &= \frac{1}{2}(G1 - D1) \\ x_{02} &= \frac{1}{2}(G2 - D2) \end{aligned} \quad (7)$$

Donde $G1$ es la distancia entre S1 y S2, $G2$ es la distancia entre S1 y S3, $D1$ y $D2$ son las distancias obtenidas con la ecuación (6) a partir de las diferencias de tiempo respectivas (Δt) entre estas estaciones, asumiendo una velocidad de propagación constante (v). Por ejemplo:

$$D1 = v \cdot (t_2 - t_1) \quad (8)$$

Se calculan otros valores auxiliares:

$$\begin{aligned} m &= \frac{G1 D2}{G2 D1} \\ n &= x_{02} + \frac{D2}{G2}(x_{02} - x_{01}) - \frac{G1 D2}{G2 D1} x_{01} \end{aligned} \quad (9)$$

Se calcula el ángulo α :

$$\alpha = \alpha_1 - \alpha_2 \quad (10)$$

Donde el ángulo α_1 es el ángulo de la dirección de S2, visto desde la estación base S1. De manera similar, α_2 es el ángulo de orientación de la dirección de la estación S3, nuevamente vista desde S1. El ángulo α se forma a partir de la diferencia de estos dos ángulos.

Desarrollando las ecuaciones anteriores y derivando, se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} z &= \left[\left(\frac{G1}{D1} \right)^2 - 1 \right] - \left(\frac{m - \cos \alpha}{\sin \alpha} \right)^2 \\ p &= -2x_{01} \left[\left(\frac{G1}{D1} \right)^2 + \frac{G1}{D1} \right] - \frac{2n}{\sin^2 \alpha} (m - \cos \alpha) \\ q &= \left[x_{01} \left(\frac{G1}{D1} + 1 \right) \right]^2 - \frac{n^2}{\sin^2 \alpha} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} a_1^{L1/L2} &= \frac{-p}{2z} \pm \frac{\sqrt{p^2 - 4zq}}{2z} \\ b_1^{L1/L2} &= \frac{m a_1^{L1/L2} + n}{\sin \alpha} - a_1^{L1/L2} \end{aligned} \quad (12)$$

Donde, a_1 y b_1 son las componentes x e y , respectivamente, de un sistema de coordenadas ficticio con el origen en S_1 y el eje x en la dirección S_2 . Determinan los dos puntos hiperbólicos de intersección entre L_1 y L_2 .

La distancia R desde la estación base S_1 a los dos puntos de solución es:

$$\begin{aligned} R^{L1} &= \sqrt{(a_1^{L1})^2 + (b_1^{L1})^2} \\ R^{L2} &= \sqrt{(a_1^{L2})^2 + (b_1^{L2})^2} \end{aligned} \quad (13)$$

En coordenadas esféricas (Λ, Φ) el resultado final para los puntos solución es:

$$\begin{aligned} \Lambda^{L1} &= \lambda_{S1} + R^{L1} \sin \beta^{L1} \quad , \quad \Phi^{L1} = \phi_{S1} + R^{L1} \cos \beta^{L1} \\ \Lambda^{L2} &= \lambda_{S1} + R^{L2} \sin \beta^{L2} \quad , \quad \Phi^{L2} = \phi_{S1} + R^{L2} \cos \beta^{L2} \end{aligned} \quad (14)$$

Para más información sobre el desarrollo de cómo se han obtenido estas ecuaciones y su aplicación, consultar Schmidt (2007).

Estos principios son el punto de partida del algoritmo de detección, que se diferencia de otros sistemas por usar un método en 3D.

El algoritmo 3D permite discriminar el tipo de rayo (IC/CG), en vez de, tener que observar el tipo de señal para discriminar, como en otros sistemas de detección (Betz et al., 2009b), como se puede ver en la Figura 29.

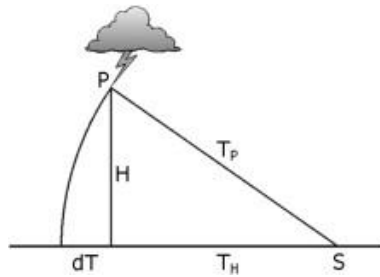


Figura 29. Principio de reconocimiento de rayos IC de LINET. Las señales IC y CG de la misma localización 2D llegan con un tiempo de diferencia. (Adaptado de Betz et al., 2009b)

Según indica Betz et al. (2009b), la red tiene una precisión de localización (en el centro de la red) de unos 100 m. Esta precisión se ha validado en torres con rayos ascendentes inducidos, comprobando que las localizaciones de LINET se encontraban en un error medio inferior a los 100 m, tal como se muestra en los gráficos de la Figura 30, donde la torre está situada en el centro de coordenadas y las detecciones del LLS alrededor a una distancia inferior a 100 m.

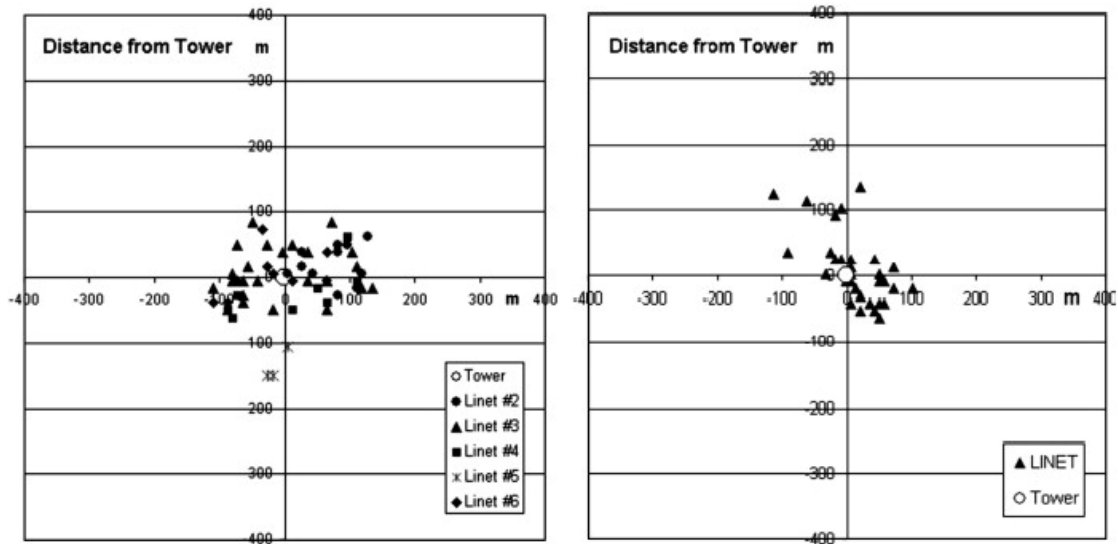


Figura 30. Ejemplo de la precisión de LINET en rayos localizados en dos torres. (Adaptado de Betz et al., 2009b).

3.2 Instalación en España y Portugal

A finales de 2007 se empezó una colaboración con el Prof. Betz para expandir la red europea LINET en España y Portugal y hacer su mantenimiento. Entonces, la red, con origen en Alemania, se había extendido desde allí hacia los países vecinos. España, empezando por Cataluña, era la extensión de la red ya instalada en Francia. Esta colaboración permitiría poder disponer de datos de rayos de precisión en la Península Ibérica y ampliar la cobertura europea y de los mares Mediterráneo y Cantábrico.

3.2.1 Ubicación y montaje de sensores

Se requerían ubicaciones donde la antena LINET y el GPS se pudiera montar en el exterior con buena visibilidad. Por otro lado, el procesador tenía que estar instalado en el interior con conexión a Internet (como muestra la Figura 31). Cada montaje requería una complejidad distinta. Un obstáculo era comprobar que la ubicación no presentara ruido electromagnético. Alguna vez estos problemas de ruido no salían a la luz hasta después del montaje, p.ej. un motor de algún equipo cercano que hasta entonces no había funcionado a máxima potencia. Entre 2007 y 2020 se instalaron 25 sensores de LINET en toda la Península Ibérica (Figura 32).

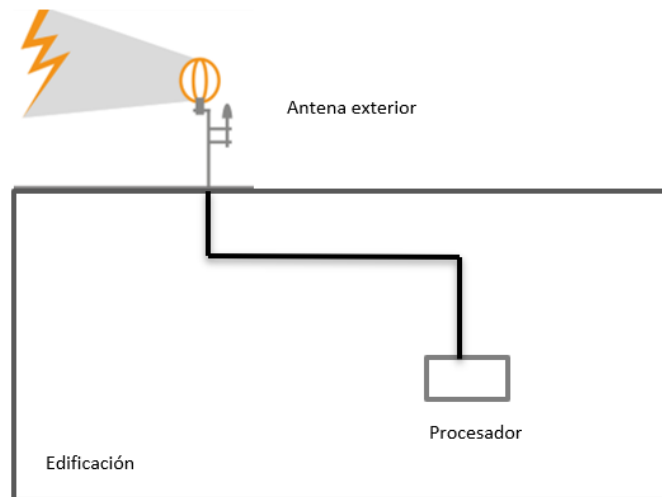


Figura 31. Esquema de disposición y requisitos de instalación de un sensor LINET. (Incluye elementos adaptados de nowcast,2023)



Figura 32. Instalación de sensores LINET.

3.2.2 Base de datos

El resultado de tener una red extensa de detección de rayos es una base completa de datos de rayos con histórico desde 2009 en la zona nordeste de la Península y desde 2012 para el resto. Esta base de datos de rayos se actualiza a tiempo real con los datos enviados por nowcast.

De 2007 a 2022 se han detectado más de 50 millones de *strokes* en la Península Ibérica, concretamente en el gráfico de la Figura 33 se puede observar el número de descargas (*strokes*) detectados cada año por esta red en la Península Ibérica. Al inicio había menos detecciones, principalmente a la menor cobertura del número de sensores instalados, a medida que se fue ampliando la red, se detectó un mayor número de descargas de rayo.

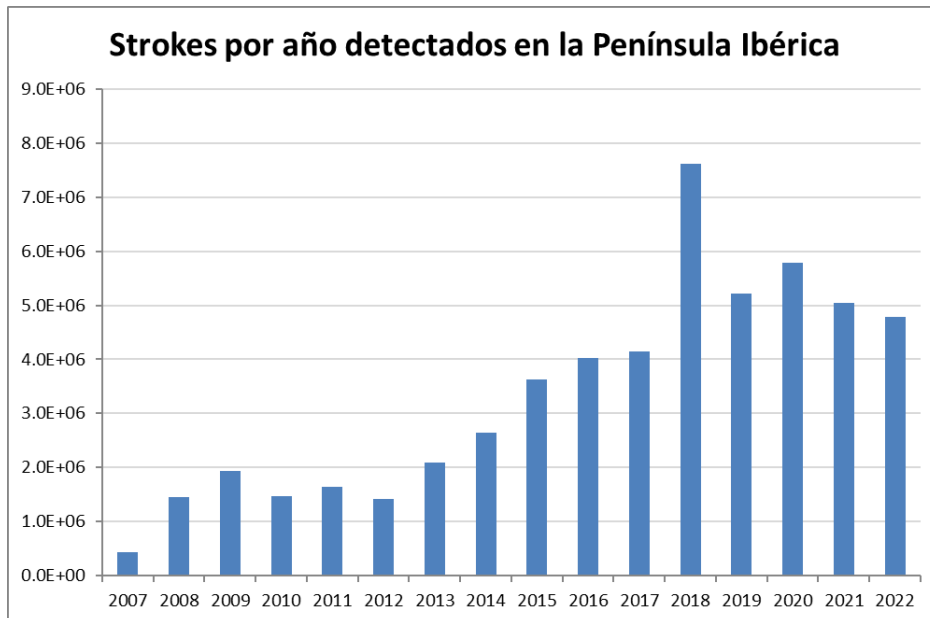


Figura 33. Descargas de rayo (*strokes*) anuales detectados por LINET en la Península Ibérica.

3.2.3 Mantenimiento de sensores

Los sensores trabajan ininterrumpidamente. Si hay algún fallo se ha de analizar el motivo y solucionarlo cuanto antes. Este mantenimiento de sensores en la Península Ibérica se ha realizado íntegramente desde 2007 hasta inicios de 2023.

3.3 Conclusiones y contribuciones en artículos publicados

Gracias a la instalación de esta red, se han obtenido datos de rayos para múltiples estudios y publicaciones no sólo del LRG de la UPC, si no que al ser una red Europea, los sensores de la Península contribuyen a la detección de rayos de los países cercanos (Francia, Italia, Marruecos o el Reino Unido) y estos datos de rayos se han utilizado en proyectos europeos como p. ej. la misión *Atmospheric Space Interaction Monitor* (ASIM), un observatorio de rayos para la Estación Espacial Internacional.

Todos los datos de rayos que se utilizan en los siguientes capítulos de esta tesis también provienen de la red LINET. Por lo que este trabajo experimental es el previo e inicial de esta tesis

Gracias a estos datos se han podido elaborar los siguientes capítulos de esta tesis doctoral y las contribuciones en los artículos siguientes:

- Montaña, J.; López, J.; Van Der Velde, O.; Sola, G.; Romero, D.; Morales, C.; Visacro, S.; Saba, M.; Goodman, S.; Williams, E.R.; Peterson, M.; Pineda, N.; Sousa, M.; Aranguren, D. Potential use of space-based lightning detection in electric power systems. *Electric Power Systems Research*. 2022. Vol.: 213. Número: 108730. <<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108730>>
- Salvador, A.; Pineda, N.; Montaña, J.; López, J.; Sola, G. Thunderstorm charge structures favouring cloud-to-ground lightning. *Atmospheric Research*. 2021. Vol. 257. <<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105577>>
- Montaña, J.; López, J.; Morales, C.; Van Der Velde, O.; Fabro, F.; Pineda, N.; Navarro, J.; Reglero, V.; Neubert, T.; Chanrion, O.; Goodman, S.; Ostgaard, N.; Ladino, A.; Romero, D.; Sola, G.; Horta-Bernús, R.; Freijo, M. A simultaneous observation of lightning by ASIM, Colombia-Lightning Mapping Array, GLM, y ISS-LIS. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2021. Vol.: 126. Número: 6.. <<https://doi.org/10.1029/2020JD033735>>

4 Eficiencia de detección de los sistemas de detección de rayos (LLS)

En este capítulo se establece una metodología para evaluar un LLS, como el que se ha presentado en el capítulo 2, basada en una metodología propuesta por CIGRE, que permite conocer si el LLS tiene una buena eficiencia.

4.1 Introducción

Para proteger contra el rayo cualquier estructura o sistema, es necesario conocer si está muy expuesto a la actividad de rayos. Esta información se cuantifica con la GFD de la zona, si se trabaja con *flashes*, o la densidad de descargas a tierra (*lightning ground stroke density*, GSD), si se utilizan *strokes*. Como indica el apartado 2.2.6, se elaboran mapas de GFD a partir de datos de rayos obtenidos con LLS para los estudios de riesgo de rayos.

Cuando se trabaja con LLS, un concepto importante es la incertidumbre. En general, con cualquier magnitud que se trabaje, se necesita saber su precisión.

En el caso de la GSD ($strokes \cdot km^{-2} \cdot año^{-1}$), la magnitud real será la medida con el LLS y tendrá una incertidumbre (U), tal como indica la ecuación:

$$GSD_{real} = GSD_{medida} \pm U \quad (15)$$

La incertidumbre será la que aportan los diferentes parámetros individuales que la afectan como indica la ecuación (16).

$$U = \sqrt{\sum U_i^2} \quad (16)$$

En este estudio tratamos como evaluar la incertidumbre de un LLS, que afecta a la eficiencia de detección (*detection efficiency*, DE), ya que un LLS no detecta el 100% de los rayos. En el segundo apartado de este capítulo se presentan los parámetros que influyen en un LLS y cómo afectan a la DE. El tercer apartado muestra distintos métodos para calcular la DE del sistema. El cuarto apartado valora qué método utilizar para la evaluación de la DE y presenta una herramienta de cálculo para encontrarla. Al final del capítulo se encuentran las conclusiones.

4.2 Parámetros de un LLS

Para evaluar los LLS hay varios parámetros a tener en cuenta que afectan a su eficiencia y precisión, que aportarían incertidumbre a la ecuación (16) y que se describen a continuación.

4.2.1 Corriente de pico

Tal como se explica en el apartado 2.2.5, la corriente de pico de las RS de un LLS se obtiene a partir del campo electromagnético.

Cuanto mayor sea la corriente de pico de la RS, mayor será el campo electromagnético que produce.

Según el modelo de RS de línea de transmisión (Uman et al., 1975, CIGRE TF C4.404A, 2009), el pico de corriente I_p está relacionado con el pico de campo eléctrico lejano E_p y con la velocidad del recorrido de la RS (suponiendo que la velocidad es constante, el suelo es perfectamente conductor y la RS no ha llegado a la parte superior del canal) a través de la siguiente expresión:

$$I_p = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot c^2 \cdot D}{v} \cdot E_p \quad (17)$$

En la expresión (17), D es la distancia horizontal entre el canal del rayo y el punto de observación, v es la velocidad de la RS, ϵ_0 la permitividad eléctrica en el vacío y c es la velocidad de la luz.

La expresión correspondiente al pico de campo electromagnético lejano H_p es:

$$I_p = \frac{2 \cdot \pi \cdot c \cdot D}{v} \cdot H_p \quad (18)$$

Es difícil determinar con precisión la intensidad de la RS, que depende de la naturaleza del rayo, pero, según Rachidi et al. (2004) y CIGRE TF C4.404A (2009), con los LLS es posible tener una buena estimación de la media y la desviación estándar de la corriente.

La intensidad dependerá de la naturaleza del rayo, p. ej. los rayos ascendentes iniciados en estructuras altas suelen presentar corrientes de pico menores, por lo que la señal electromagnética es más baja y puede no ser detectada por un sensor.

4.2.2 Velocidad de la descarga de retorno (RS)

Según las ecuaciones (17) y (18), los rayos con mayor velocidad de la RS producirán un mayor campo electromagnético.

La velocidad, al igual que la intensidad, dependerá de la naturaleza del rayo.

4.2.3 Propagación del campo electromagnético

Los campos electromagnéticos producidos por la corriente de la RS se atenúan a medida que se propagan entre el rayo y el punto de observación (sensor).

Una conductividad de tierra perfecta (infinita) produciría campos teóricos de acuerdo con la ecuación (5).

La magnitud del campo resultante en una ubicación remota del sensor, que establece la detectabilidad de la señal por ese sensor, está determinada por la atenuación de esta intensidad de campo. Esta atenuación se produce debido a la propagación normal y las pérdidas adicionales debidas a la conductividad finita a lo largo de la ruta de propagación (CIGRE TF C4.404A, 2009).

Cuanto más cerca estén los sensores, menos se reducirá la señal electromagnética por la baja conductividad del suelo. A pesar de que existen mapas de conductividad del suelo, la contribución a la atenuación de la señal electromagnética es complicada de calcular.

4.2.4 Umbral de detección del sensor

Cada sensor de una red de detección de rayos tiene las siguientes características:

- a) Nivel de ruido (de fuentes locales y remotas).

El ruido en un sensor se puede producir localmente (p. ej. inducido por sistemas eléctricos de alta potencia) y de forma remota (p. ej. provocado por transmisiones de radio). Las señales de rayos a detectar deben ser superiores al nivel de ruido. Por este motivo, los sensores ruidosos tienen menos posibilidades de detectar rayos con emisiones débiles.

- b) Ganancia y saturación.

Un sensor con mayor ganancia puede ser más sensible si se ajusta su relación señal-ruido, entonces, la DE de este sensor para eventos débiles será alta. Sin embargo, la posibilidad de saturación debido a rayos cercanos es mayor.

- c) Umbral de detección.

El umbral de detección limita a partir de qué señales mide. Un sensor distinguirá una señal sobre el nivel de ruido mediante una señal de *trigger*. Si un umbral es demasiado bajo, el sensor producirá muchos registros falsos y puede perder señales de rayos reales en el caso de que tenga un tiempo muerto entre registros sucesivos. El umbral de detección también puede afectar a la DE de un sensor.

Todos estos parámetros relacionados con el umbral de detección del sensor dependen del fabricante del sensor e incluso de cada sensor individual. Si la calidad en términos de ruido y ganancia es pobre, sólo se detectarán rayos cercanos o los más potentes. Esta información es difícil de obtener por parte del fabricante.

4.2.5 Técnica de detección y banda de frecuencia

Las distintas técnicas de detección (descritas en el capítulo 2.2): MDF, TOA o la combinación de estas dos; si el sistema mide campo eléctrico únicamente, campo magnético únicamente o bien los dos; y el espectro de frecuencia en el que miden la señal (VLF, LF, HF, VHF), influyen en la eficiencia de precisión de la localización.

MDF únicamente se empleó en los primeros sistemas de detección. Puede presentar grandes errores de ubicación que afectarían la precisión y, por lo tanto, el cálculo de las densidades de rayos.

La combinación TOA y MDF/TOA es bastante utilizada en la actualidad, ya que las dos técnicas a la vez permiten resolver ambigüedades en ciertos casos, usando menos sensores para la detección.

Las redes que emplean VHF con distancias muy cortas entre sensores, del orden de unos pocos kilómetros, pueden tener una DE muy alta de todos los rayos (IC y CG). La distinción entre CG e IC se puede realizar mediante la identificación de los líderes a tierra y no por la RS.

Dado que la emisión de RS más fuerte se encuentra en el rango de kHz, las técnicas VLF parecen ser más sensibles. En la actualidad, los sistemas VLF y VLF/LF son de uso común.

Los sistemas LF y HF mejoran el rango de medición del espectro, pero también agregan ruidos de señales humanas, como los de radios (de transmisión, de aficionados, radios militares...) o relojes.

4.2.6 Número de sensores implicados en la detección

Dependiendo de la técnica de detección y del fabricante, es necesario un número de sensores distinto para obtener la ubicación del mismo rayo.

El número mínimo típico de sensores requeridos es: 2 en el caso de MDF/TOA, 3-4 para TOA y 2-3 en MDF.

Cuantos más sensores participen en determinar una ubicación, mayor será la precisión. Es importante conocer por parte del fabricante, cuantos sensores utiliza para la detección del rayo.

4.2.7 Geometría de la red

Los sensores deben rodear la ubicación a monitorizar. Si están demasiado cerca, la señal del rayo puede saturar los sensores, pero serán más efectivos para detectar rayos débiles. Si están alejados, la DE baja porque no se detectan señales pequeñas.

4.2.8 Clasificación o discriminación

Una red utiliza un criterio de discriminación para clasificar las descargas CG y las IC. El criterio es propio del fabricante. Las evaluaciones experimentales de las redes de detección demuestran que la clasificación errónea puede ser común, especialmente en eventos de baja corriente (Cummins y Murphy, 2009; San Segundo et al.,

2020). En algunos casos, los rayos CG positivos con picos de corriente inferiores a 10 kA se consideran rayos IC (Rudlosky y Fuelberg, 2010).

Sin embargo, los rayos iniciados por estructuras altas (como turbinas eólicas) pueden ser clasificadas como IC ya que el RS puede producirse a altitudes más altas.

4.3 Métodos para evaluar la incertidumbre de un LLS

A continuación, se proponen dos métodos para evaluar la incertidumbre de un LLS.

4.3.1 Método directo

Es un método simple propuesto en CIGRE TF C4.404A (2009) que se basa estimando la GFD medida por el LLS a partir de la DE de flash.

$$GFD_{real} = \left(\frac{GFD_{medida}}{DE_{est}} \right) \quad (19)$$

Donde DE_{est} es el valor indicado de DE por estudios de referencia para situaciones similares y que es constante en regiones de tamaño moderado.

Lo mismo se aplica con la GSD:

$$GSD_{real} = \left(\frac{GSD_{medida}}{DE_{est}} \right) \quad (20)$$

En la Tabla 7 y la Tabla 8 se resumen los valores de la DE de diferentes estudios.

4.Eficiencia de detección de los sistemas de detección de rayos (LLS)

Tabla 7. Resumen valores de Flash DE en estudios de referencia.

DE	Método	Método / localización	Referencia	Comentarios
1	Experimental	Gaisberg	CIGRE TF C4.404A (2009) pág. 74	<i>flashes</i> con más de 10 kA 5 sensores en 150 km
1	Experimental	Torre CN	CIGRE TF C4.404A (2009) pág. 81	NLDN 5 sensores en menos de 305 km <i>strokes</i> >6 kA
1	Teórico	Resumen en CIGRE TF C4.404A (2009) pág. 91 Red compacta		
0.99	Experimental	Gaisberg	CIGRE TF C4.404A (2009) pág. 74	<i>flashes</i> con más de 7 kA 5 sensores en 150 km
0.97	Teórico	N=2 (n.º de sensores necesarios)		6 sensores en la red (MDF/TOA) Línea de base 150 km
0.97	Experimental	Gaisberg	CIGRE TF C4.404A (2009) pág. 73	<i>flashes</i> con más de 5 kA 5 sensores en 150 km
0.965	Teórico	N=2 (n.º de sensores necesarios)		6 sensores en la red Línea de base 200 km
0.95	Teórico	Resumen en CIGRE TF C4.404A (2009) pág. 91 Línea de base estándar		
0.95	Experimental	Vídeo	Kehoe y Krider (2004), Tucson en 2003 NLDN mejorada en 2002	
0.945	Teórico	N=2 (n.º de sensores necesarios)		5 sensores en la red Sólo eventos > 10 kA Línea de base 200 km
0.94	Teórico	N=2 (n.º de sensores necesarios)		5 sensores en la red Sólo eventos > 10 kA Línea de base 200 km
0.93	Experimental	Vídeo	Biagi et al. (2007)	Período 2003-2004
0.922	Teórico	N=3 (n.º de sensores necesarios)		6 sensores en la red Línea de base 150 km
0.92	Experimental	Vídeo	Biagi et al. (2007)	Período 2003-2004 (localización TX-OK, US)
0.904	Teórico	N=3 (n.º de sensores necesarios)		6 sensores en la red Línea de base 200 km
0.9	Teórico		ALDIS	
0.895	Teórico	N=2 (n.º de sensores necesarios)		6 sensores en la red Línea de base 300 km
0.89	Experimental	Gaisberg	CIGRE TF C4.404A (2009) pág. 73	<i>flashes</i> 5 sensores en 150 km
0.86	Experimental	Vídeo	Idone et al. (1998)	1994
0.84	Teórico	N=3 (n.º de sensores necesarios)	CIGRE TF C4.404A (2009)	5 sensores en la red Sólo eventos > 10 kA Línea de base 200 km

0.84	Experimental	Rocket	CIGRE TF C4.404A (2009) pág. 83	
0.812	Teórico	N=3 (n.º de sensores necesarios)	CIGRE TF C4.404A (2009)	5 sensores en la red Sólo eventos > 10 kA Línea de base 200 km
0.806	Teórico	N=4 (n.º de sensores necesarios)	CIGRE TF C4.404A (2009)	6 sensores en la red Línea de base 150 km
0.766	Teórico	N=4 (n.º de sensores necesarios)	CIGRE TF C4.404A (2009)	6 sensores en la red sólo TOA Línea de base 200 km
0.765	Teórico	N=3 (n.º de sensores necesarios)	CIGRE TF C4.404A (2009)	6 sensores en la red Línea de base 300 km
0.72	Experimental	Vídeo	Idone et al. (1998)	1995 menos sensores que en 1994
0.71	Experimental	Vídeo	Parker y Krider (2003) Tucson en 2001	
0.7	Experimental	DF	Mach et al. (1986)	TV camera
0.67	Experimental	Vídeo	Idone et al. (1998)	1993
0.603	Teórico	N=4 (n.º de sensores necesarios)	CIGRE TF C4.404A (2009)	5 sensores en la red Sólo eventos > 10 kA Línea de base 200 km
0.583	Teórico	N=4 (n.º de sensores necesarios)	CIGRE TF C4.404A (2009)	5 sensores en la red Sólo eventos > 10 kA Línea de base 200 km
0.563	Teórico	N=4 (n.º de sensores necesarios)	CIGRE TF C4.404A (2009)	6 sensores en la red (sólo TOA) Línea de base 300 km

Tabla 8. Resumen valores de Stroke DE en estudios de referencia.

DE	Método	Localización / Referencia	Comentarios
0.99	Experimental	Gaisberg	Corrientes superiores a 10 kA
0.99	Experimental	Gaisberg	Corrientes superiores a 5 kA
0.9	Teórico	Resumen en CIGRE TF C4.404A (2009) pág. 91 Límite superior de una upper limit of a modern network	
0.86	Experimental	Biagi et al. (2007)	Vídeo
0.8	Teórico	Resumen en CIGRE TF C4.404A (2009) report pág. 91 Lower limit of a modern network	
0.78	Experimental	Vídeo	Kehoe y Krider (2004) Tucson en 2003 NLDN upgraded en 2002
0.76	Experimental	Vídeo	Biagi et al. (2007)
0.7	experimental	Tampa FL	Vídeo 1st stroke
0.687	experimental	Gaisberg	All
0.67	Experimental	Idone et al. (1998)	Vídeo
0.6	Teórico	CIGRE TF C4.404A (2009) pág. 56	
0.6	Experimental	Cohete	

0.47	Experimental	Idone et al. (1998)	Vídeo
0.41	Experimental	Parker y Krider (2003)	Vídeo Tucson en 2001
0.4	Experimental	Tampa FL	Vídeo <i>strokes</i> subsecuentes
0.3	Teórico	Rubinstein et al. (1995)	

4.3.2 Método gráfico de distribución de corriente

En CIGRE TF C4.404A (2009) se presenta otra forma para corregir los valores de GFD que se basa en comparar la distribución de corrientes de pico de las descargas de rayo (*strokes* o *flashes*, según proceda) que mide un LLS con una de referencia. La forma y los parámetros de la distribución de corrientes de pico son muy sensibles a la DE de un LLS. P. ej. en una región de Estados Unidos se recogieron las corrientes de pico obtenidos por el sistema de LLS NLDN de varias semanas en 1998 para obtener la distribución (“All” en el gráfico de la Figura 34). Entonces se reprocesaron estos datos de rayos reduciendo el número de sensores que participaban en la detección del rayo para producir tres condiciones de DE diferentes (99%, 89% y 75% de la Figura 34). Estas distribuciones acumuladas detectan el 100% de los rayos en las corrientes más altas. Cuando la DE se reduce, hay un incremento en la intensidad mínima a partir de la cual se detecta. La distribución “99%” se superpone exactamente sobre la curva producida en la condición “All”, pero hay un aumento en la intensidad mínima detectable cuando la curva alcanza 1.0, lo que refleja que un factor determinante de la DE es la probabilidad de detección en función de la corriente. Los eventos con corriente inferior a la mínima detectable no se registran y casi todos los rayos con valores superiores a partir de una corriente mayor se detectan. Los valores entre medio se detectan con más probabilidad a medida que aumenta la corriente. Estas diferencias de DE también afectan a la media de las corrientes (ver Tabla 9), que aumenta a medida que disminuye la DE. Este comportamiento entre DE y la intensidad se ha visto en distintos estudios, como el de Diendorfer et al. (2002).

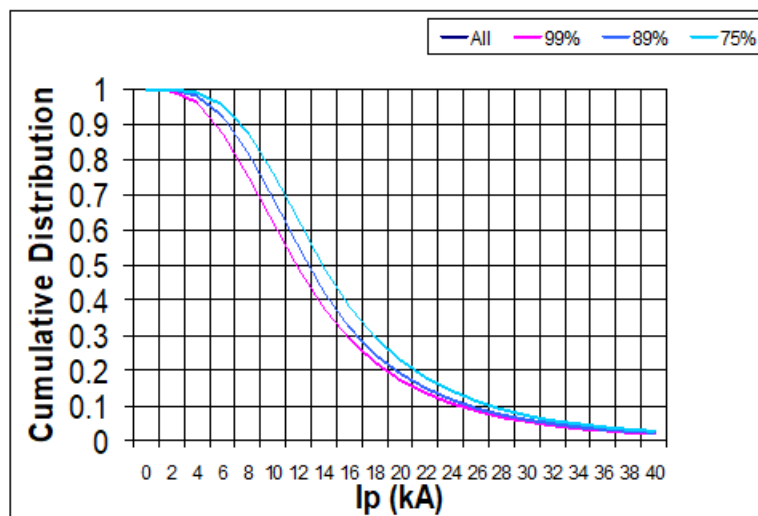


Figura 34. Distribución acumulada de corrientes de la red NLDN en la misma región de EE. UU. para 4 condiciones diferentes de DE. (Adaptado de CIGRE TF C4.404A, 2009).

Tabla 9. Corriente de pico media y mediana de la distribución de corrientes para las 4 condiciones diferentes de DE en una región de EE. UU. con la red NLDN. (Adaptado de CIGRE TF C4.404A, 2009).

Relative DE	Mean I_p (kA)	Median I_p (kA)
100	-16.9	-13.9
99	-16.9	-13.9
89	-17.9	-14.9
75	-19.2	-16.0

Entonces el método propuesto por CIGRE TF C4.404A (2009), consiste en comparar la distribución acumulada del pico de corriente de los rayos negativos (*strokes*) de un LLS con una distribución referencia. Se representan la curva de referencia junto a la del LLS y se intentan solapar en las partes donde las 2 distribuciones sean similares, que será en la zona de corrientes a entre 10 y 20 kA. Cuando la curva del LLS ya no coincida, el porcentaje correspondiente al valor de corriente mínimo de detección, es el valor de la DE (ver Figura 35 y esquema de la Figura 36).

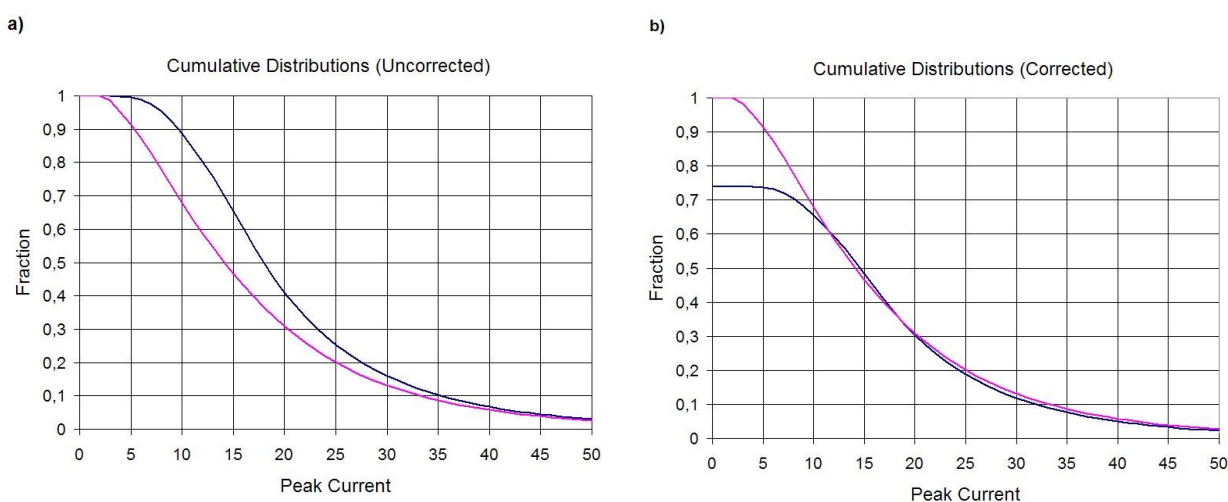


Figura 35. Ejemplo de ajuste de las curvas de distribución acumulada de las corrientes. a) Sin ajustar. b) Corregidas: curvas ya ajustadas. (Adaptado de CIGRE TF C4.404A, 2009).

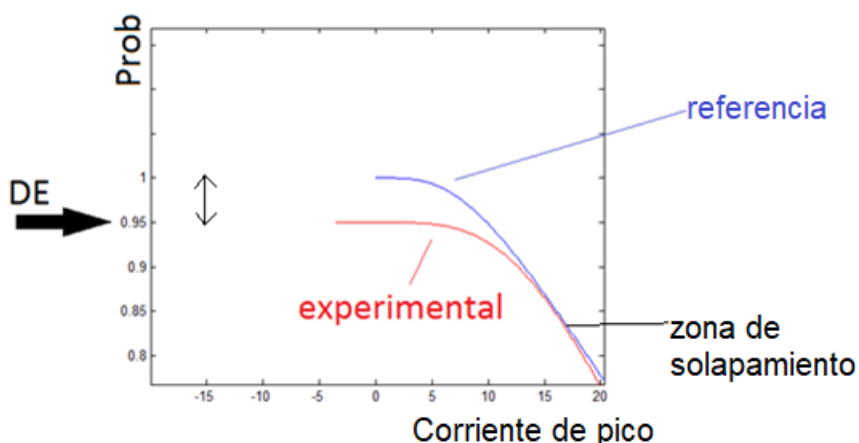


Figura 36. Esquema del método de ajuste de distribución de corrientes pico de un LLS.

La curva de referencia de CIGRE TF C4.404A (2009) consiste en una distribución Log-Normal de corrientes pico de las primeras descargas (*strokes*) negativas con una media de 19 kA y desviación estándar de 0.6. IEEE

(2010) propone como referencia una distribución de corrientes pico Log-Normal con una media de 31.1 kA y desviación estándar de 0.48 para las primeras descargas (*strokes*) y para las subsecuentes: 12.3 kA de media y desviación estándar de 0.5296. IEC (2006), para la referencia adapta de CIGRE las estadísticas de corriente que se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Media y desviación estándar de la distribución logarítmica normal de las corrientes de los rayos. (Adaptado de IEC, 2006).

Parameter	Mean μ	Dispersion σ_{\log}	Stroke type	Line in Figure A.5
I (kA)	(61,1)	0,578	*First negative short (80 %)	1A
	33,3	0,263	*First negative short (80 %)	1B
	11,8	0,233	*Subsequent negative short	2
	33,9	0,527	First positive short (single)	3

4.4 Resultados y discusión

El método directo resulta adecuado para LLS modernos y probados con una distancia entre detectores inferior a 300 km, con comparaciones previas con otras redes de referencia que tengan resultados similares. Sin embargo, para según qué situaciones, p. ej. compañías eólicas que tengan parques operativos en distintas regiones del mundo, se necesita un método que se pueda adaptar al LLS que se disponga en la zona.

El método gráfico es el que se ha adaptado para poder evaluar los LLS al ser más completo. Para ello se ha elaborado una hoja de cálculo, con la curva de referencia propuesta por CIGRE TF C4.404A (2009). Previamente, se han de seleccionar los valores de corriente de pico de las primeras descargas (*strokes*) negativas del LLS experimental. En la hoja de cálculo, se insertan todos estos valores, a partir de los cuales, automáticamente ya grafica la curva de distribución junto a la de referencia. Para acabar de ajustar la zona de solapamiento entre las dos curvas (corregir la forma, como en ejemplo de Figura 35), hay 4 factores que afectan la curva experimental:

1. Base mult. – valor con el que se contrae horizontalmente o dilata horizontalmente la curva experimental, según si el valor está entre 0 y 1 o es mayor que 1, respectivamente.
2. Current offset – valor por el cual el eje de abscisas de la curva experimental se traslada tantas unidades como indica el valor.
3. ILDS MULT- valor con el que se contrae verticalmente o dilata verticalmente la curva experimental, según si el valor está entre 0 y 1 o es mayor que 1, respectivamente.
4. Eff. Offset – valor por el cual el eje de ordenadas de la curva experimental se traslada tantas unidades como indica el valor.

Al ser una hoja de cálculo es una herramienta accesible, que facilita encontrar la DE de una forma agilizada.

A continuación, se presentan un caso de ejemplo de aplicación de esta herramienta y en el Anexo I se detalla el método para aplicarlo paso a paso:

Caso de ejemplo: DE red LINET (datos de 2009 a 2012 en Cataluña) es de 0.93 aplicando la herramienta del método gráfico de distribución de corriente (Figura 37).

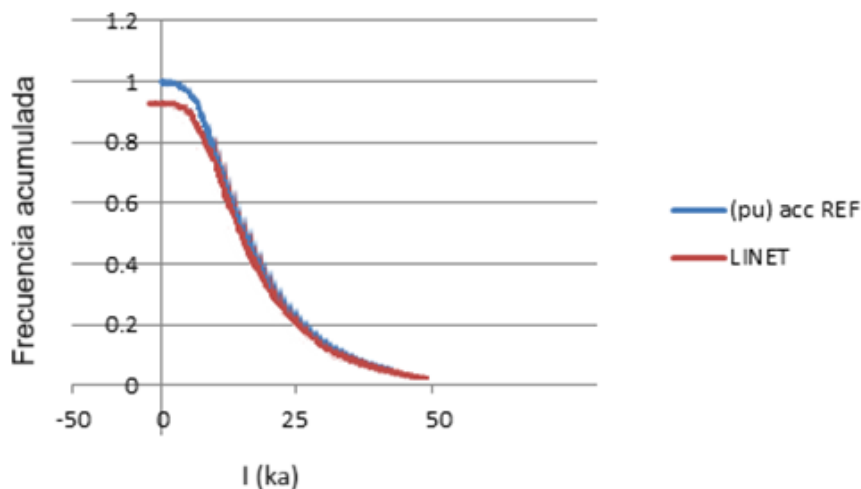


Figura 37. Curva de distribución de corriente de pico de LINET, ajustada con la de referencia con la herramienta elaborada.

La validación de esta herramienta se llevó a cabo con el caso 2, en el que, para todos los rayos detectados con LINET, la DE es de 0.95. A los valores de corriente se extrajeron los inferiores a 10 kA, por lo que resultó una DE del 0.80 (Figura 38).

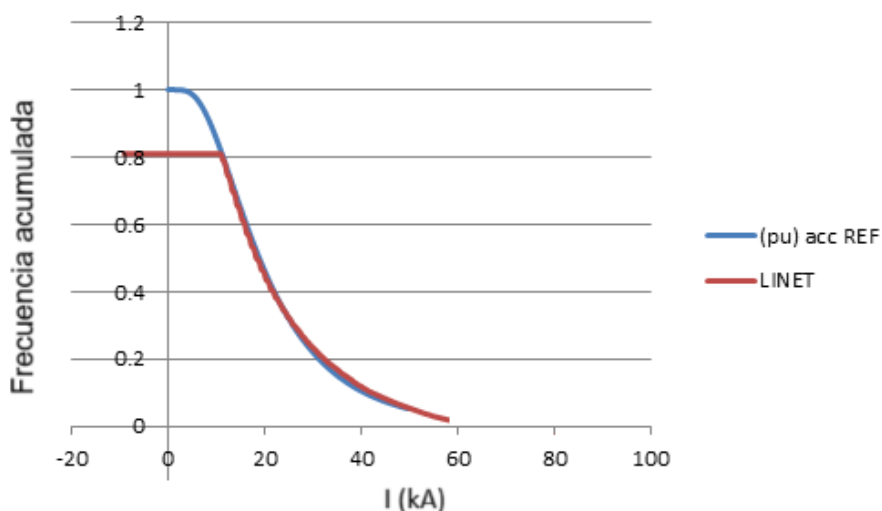


Figura 38. Curva de distribución de corriente de pico de LINET excluyendo valores <10 kA, ajustada con la de referencia con la herramienta elaborada

En la curva de referencia los rayos (*flashes*) con corrientes de pico mayores a 10 kA representan un 85%, por lo que es coherente que LINET sólo con valores de corrientes de pico mayores a 10 kA, se obtenga una eficiencia de 0.80 (80%) como resultado, debido a que pierde el 15% de *flashes* con valores inferiores al 10% y también detecta menos por lo que pierde eficiencia (~5%).

Se describe paso a paso esta metodología en el Anexo I.

4.5 Conclusiones y contribuciones en artículos publicados

Cuando se trabaja con distintas redes de detección (según el país/región hay un sistema u otro), para p. ej. evaluar el riesgo de rayos, una de las preocupaciones era cómo poder determinar la DE al haber tantos parámetros y tan variables que influyen en el buen funcionamiento y eficiencia de un LLS.

Con la herramienta de cálculo de la DE presentada en este capítulo, basada en el método gráfico de la distribución de corrientes, expuesto en CIGRE TF C4.404A (2009), se ha obtenido una forma de encontrar la DE relativamente ágil y versátil, que se puede adaptar a los LLS de diferentes características.

Esta herramienta ha contribuido en el siguiente artículo:

- March, V., Montanya, J. & Pineda, N. (2014). Negative lightning current parameters and detection efficiency for two operational LLS in Catalonia (NE Spain). 2014 International Conference on Lightning Protection, ICLP 2014. 966-973. 10.1109/ICLP.2014.6973263.

5 Recurrent lightning spots

Este capítulo corresponde al artículo enviado a la revista *Journal of Geophysical Research JRG: Atmospheres*, con referencia #2023JD039066. Esta versión corresponde a la primera revisión corregida de acuerdo con los comentarios de los revisores.

Para mantener el formato presentado, el idioma y la numeración de las figuras es distinta al resto del documento de la tesis. Las referencias del artículo se encuentran en la bibliografía (capítulo 9). La información de soporte del artículo se incluye en el apartado 5.8.

Recurrent Lightning Hotspots: Where Lightning Strikes More than Twice

G. Sola¹, J. A. López¹, J. Montanyà¹, N. Pineda^{2,1} and E. R. Williams³

¹Electrical Engineering Department, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain

²Servei Meteorològic de Catalunya · Remote Sensing Unit, Barcelona, Spain

³Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA

Corresponding author: Glòria Solà (gloria.sola@upc.edu)

5.1 Key Points:

- Recurrent lightning spots are targets with at least one or more CG lightning flashes per year during a certain number of consecutive years.
- In Catalonia (Spain), 13 % of the recurrent lightning spots are telecommunication towers, 84 % mountainous areas and 5 % are offshore sites.
- The method is a powerful to find tall structures affected by lightning in a tropical climate when the flash density does not highlight them.

5.2 Abstract

The expression “lightning never strikes twice” is taken apart in this paper because, among the randomness of lightning impacts, some spots are hit even more than twice: year after year. This article presents the recurrent lightning spots (RLS), which are locations periodically impacted by cloud-to-ground lightning every consecutive year over a certain period. RLS in two regions, with markedly different lightning climatology but similar orography, are investigated for ten consecutive years: Catalonia (North East of Spain, Europe) and Barrancabermeja (in North Central Colombia, South America). Results revealed 148 and 916 RLS in Catalonia and Barrancabermeja, respectively. RLS in both regions are typically found to be related to tall structures, mountain peaks, and steep terrain. The method allowed us to identify those tall towers and orographic relief frequently affected by lightning that are not detected with the mere computation of the ground flash density. Besides the scientific interest in understanding lightning, the new concept of RLS provides new valuable information directly applicable to lightning protection engineering.

5.3 Introduction

Lightning climatology is generally analyzed through two parameters: ground flash density (GFD, lightning flashes per km² and year) and thunderstorm days (Td), which are the number of days with thunderstorm activity but not relying on the number of lightning flashes. For a given grid (e.g., 20 km x 20 km), these two parameters have been calculated over a time series and a given region worldwide. Once analyzing these maps, lightning hotspots arise, showing the places with maximum thunderstorm activity. Usually, scientists determine lightning hotspots as places that reflect the maximum lightning activity during the analyzed period, measuring the average ground flash density (GFD, fl · km⁻² · yr⁻¹) or the annual Td. For example, Albrecht et al. (2016), analyzed 16 years of lightning dataset from the Lightning Imaging Sensor (LIS). They found the top-ranked hotspot over Lake Maracaibo in Venezuela, with 297 days per year of lightning occurrence. Also, Enno et al. (2020) identified the most prominent hotspot in Europe in the mountains in northeastern Italy, referring to the maximum GFD per Td. In a recent paper, Oda et al. (2022) found a ranking of hotspot cities in Brazil by taking the maximum flash rate density, with São Félix do Xingu city in Pará at the top. Peterson (2019) used data from the Geostationary Lightning Mapper (GLM) over North and South America to find lightning hotspots by analyzing the highest flash rate densities. That study showed that most lightning hotspots are located in the Chocó Department in Colombia. In the Congo Basin, another study by Soula et al. (2016) analyzed lightning data from the World Wide Lightning Location Network (WWLLN) and found the maximum annual GFD in the eastern part of the Democratic Republic of Congo, with 12.86 fl · km⁻². Nevertheless, the results of these studies depend heavily upon the Lightning Location System (LLS) technology used and the period of record.

Tall structures like antenna towers have been a classic site to directly measure lightning currents for research (Rakov & Uman, 2003) and for evaluation of LLS (Nag et al., 2015) because they are sites that are frequently struck by lightning (Pichler et al., 2022; Schumann et al., 2018; Pineda et al., 2019; and Smorgonskiy et al., 2013). In some cases, lightning activity related to tall objects could increase GFD at their locations (Rachidi & Rubinstein, 2022; Sigogne et al., 2013; Watanabe et al., 2022). Kingfield et al. (2017) showed that concentrated lightning activity (above 100 cloud-to-ground strokes) was related to tall antennas. They gridded 20 years of lightning in the U.S. and correlated it with the position of high antenna structures. Wind turbines are a very susceptible type of tall structure to be hit by lightning (Montanyà et al., 2014). Studies such as March (2015) and Soula et al.(2019) showed that lightning frequently strikes them. In addition, the average GFD can increase where wind farms are installed (Soula et al., 2019).

As mentioned above, one can notice that a lightning hotspot is a concept of "area" but not related to a "geographic point," like locations with tall objects or mountain peaks. This work presents a new lightning hotspot concept called the "recurrent lightning spot" (RLS). This new definition explores places where lightning is recurrent over consecutive years. Those places would contradict the popular expression "lightning never strikes twice," which means something unlikely to happen again to the same place or person (the subtitle of this article refers to wordplay).

The paper is organized as follows. Section 2 first provides the context that motivated this work. The section continues with a description of the data and defines the methodology. Results of the application of the methodology in two different regions (Spain and Colombia) are presented in Section 3. Section 4 provides the discussion, followed by the conclusions in Section 5.

5.4 Motivation, data, and methodology

5.4.1 Motivation and the Concept of Recurrent Lightning Spot

To support the Atmosphere-Space Interactions Monitor mission (Neubert et al., 2019), the UPC Lightning Research Group established two monitoring areas: one in mid-latitudes (Spain, Europe) and another in the tropics (Colombia, South America). Global measurements of lightning activity (e.g., Christian et al., 2003) show that most lightning is concentrated in the tropics. Although these two regions present very different lightning activity, as shown in Figure 5-1, they have similar orography in terms of valleys and zones with mountains with similar altitudes (see Figure 5-S1).

Figure 5-1a shows the GFD in the selected area in southern Europe calculated with a standard grid size of 20 km x 20 km for 2012-2020. When the grid size is smaller, e.g., 3 km x 3 km (Figure 5-S2.a), elevated locations such as the Pic du Midi de Bigorre (French Pyrenees) are easily identified because the GFD at this location is much higher than its surroundings. In these locations, lightning activity is essentially dominated by upward lightning initiated by the tall object (e.g., Pineda et al., 2019). However, by doing the same exercise in the tropics, we could not identify particular man-made structures frequently affected by lightning. As shown in Figure 5-1b, GFD is very high all over the region; in the GFD map with a smaller grid (Figure 5-S2b), a location with a tall tower does not show an evident increase in the CG lightning activity compared to the surrounding region, like the case of southern Europe. This problem encouraged us to find a methodology to identify tall structures affected by lightning in tropical regions. The methodology does not focus on the number of lightning events on a particular target but on the periodicity of occurrence. We define RLS as a target with at least one or more CG lightning flashes per year during a certain number of consecutive years.

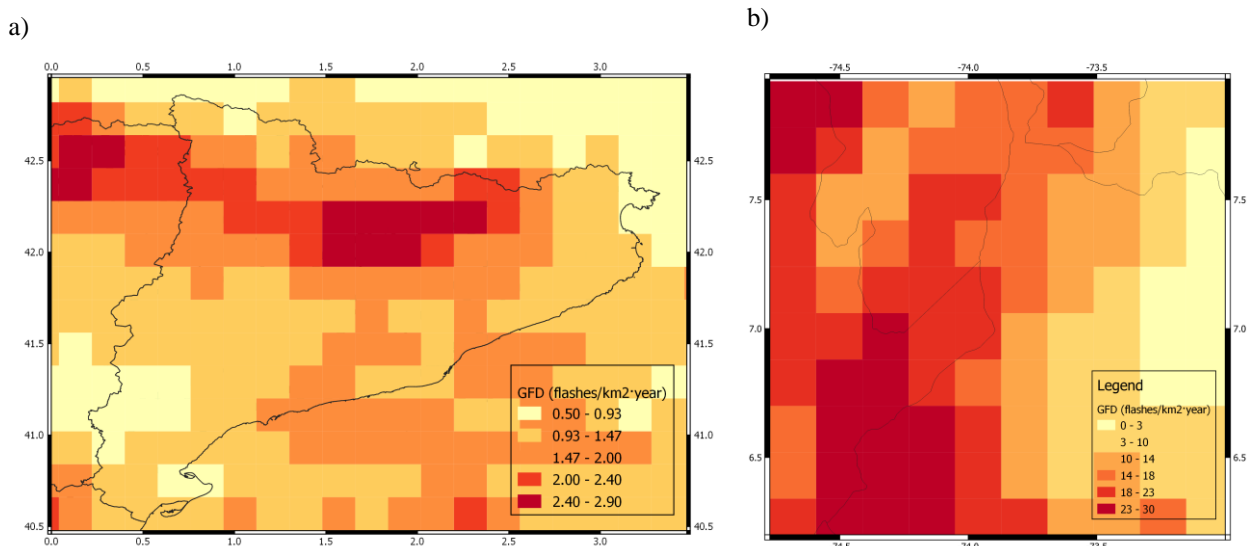


Figure 5-1. a) Map from the GFD in Catalonia (20 km grid) with LINET data 2011-2020. b) Map from the GFD in Barrancabermeja (20 km grid) with LINET data 2012-2020.

5.4.2 Data

Cloud-to-ground (CG) lightning locations are provided by the local lightning location system (LLS) of LINET (Betz et al., 2004) in the chosen regions of Spain and Colombia. LINET-Colombia comprises 21 spherics (VLF/LF) radio stations with baselines between 90 and 200 km. In the case of Catalonia (Spain), sensor baselines range from 100 to 150 km, and six radio receivers are installed

and supported by other stations around. These LLS have been fully operational in Catalonia (North East of Spain) since 2008 and in central and northern Colombia since 2012 (Aranguren et al., 2017). As the same LLS system is used in both regions, we assume the lightning data have the same calculation parameters. In Catalonia, the relative stroke detection efficiency was estimated by March et al. (2014) to be better than 70%. The location accuracy for strokes, verified with strikes to towers in other European regions with similar configurations of the LLS, is better than 500 m (Betz et al., 2009; March, 2015). While in Barrancabermeja (Colombia), according to Aranguren et al. (2017), the detection efficiency was estimated to be 95% based on the detected stroke peak currents. The mean location accuracy was estimated at 246 m with a standard deviation of 300 m. The LLS classifies the strokes as CG and intra-cloud (IC), but some low-peak current events can be misclassified (Cummins & Murphy, 2009; San Segundo et al., 2020). Accordingly, peak current-based thresholds (-6 kA for negative strokes and +8 kA for positive strokes) have been implemented to reduce misclassification. These thresholds slightly differ from the ones by Cummins and Murphy (2009) and have been adopted from the analysis by SMC (2017).

5.4.3 Methodology

The region to investigate is gridded with a fine mesh according to the localization error of the LLS. In Catalonia (Spain), a grid of $0.004^\circ \times 0.004^\circ$ (~300 m x ~400 m) was adopted, whereas in the region of Barrancabermeja (Colombia), a grid of $0.002^\circ \times 0.002^\circ$ (~200 m x ~200 m) was used. Once the grid is defined, RLS are identified as the grid cells where at least one lightning stroke is detected within every consecutive year for a certain period. In this case, a period of ~10 years was selected. An RLS will be more confident as the number of considered years increases.

To evaluate the suitability of the grid size, a sensitivity analysis is presented in the supporting information S2. The analysis examines the GFD in concentric areas from a known location with higher lightning activity than its surroundings, as previously shown for Pic du Midi de Bigorre (France). The analysis shows that for Catalonia, beyond 1 km from the point of interest, GFD stabilizes. The distance where the GFD peaks is <400 m, showing the dispersion of the detections of the target. In the case of Barrancabermeja, the peak of GFD occurs at a distance of ~200 m.

In addition, to investigate if RLS can be just a result of randomness, a Monte Carlo analysis has been developed (see section S3 in supporting information). This analysis resulted that the probability of a spot being classified randomly as an RLS is below 1.2 % for the two considered regions (see Figure 5-S5).

When the lightning activity of an RLS is possibly related to upward lightning, as commonly happens in tall towers in Europe (Rachidi & Rubinstein, 2022; Pineda et al., 2019; Sigogne et al., 2013; Watanabe et al., 2022), the method does not need any further step. A current filter is applied in areas with very high cloud-to-ground lightning density unaffected by winter lightning (e.g., the areas within the Intertropical Convergence Zone, Montanyà et al., 2016). The application of the current filter will be illustrated in the case of Colombia.

5.4.4 Case study

Two different regions have been analyzed, one in mid-latitudes and the other in the tropics, using lightning data from the lightning detection network LINET for ~10 years. These regions are in Catalonia (northeastern Spain, Europe) and an area centered at Barrancabermeja (Colombia, South America), respectively.

Each region has specific geographical and climatological characteristics. The Catalonia (Spain) region includes the mountainous range of the Pyrenees with peaks up to 3000 m asl. The other

salient geographic feature of the region is the long shoreline to the Mediterranean Sea (Figure 5-1a). The region has a Mediterranean climate, with hot and dry summers, rainy springs and falls, and cold winters. The thunderstorm season gently starts during spring and peaks in summer. From mid-September, lightning activity shifts to the seashore, which becomes dominant in autumn (SMC, 2021). The region surrounding Barrancabermeja (Figure 5-1b) is located in northeastern Colombia around the Magdalena River valley with mountain ranges up to 3000 m asl.

In our dataset of 10 years (2011-2020) of lightning in Catalonia (Spain), there are around 5 million CG stroke detections in the area of 285 x 340 km² in Figure 5-2, whereas in Barrancabermeja (Colombia), in an area of 93 x 97 km² (area in Figure 5-4) there are nearly 70 million detections in the nine years (2012-2020). In Catalonia (Spain), the computed GFD in Figure 5-1a shows that most of the territory has a GFD between 1.5 and 1.2 flashes·km⁻²·yr⁻¹, whereas it is higher in the Pyrenees (~2 - 2.9 flashes·km⁻²·yr⁻¹). These GFD values are consistent with other works such as SMC (2021), Poelman et al. (2016), and Rivas-Soriano et al. (2005). In the Barrancabermeja (Colombia) region, the calculated GFD in Figure 5-1b is up to 30 flashes·km⁻²·yr⁻¹, consistent with Aranguren et al. (2014&2017).

5.5 Results

This section presents the results of the described methodology. Figure 5-2 displays the resulting RLS in Catalonia. These 148 RLS represent 0.018 % of the total grid cells and are not necessarily in areas with high GFD. Most (84%) are located at high altitudes ranging from 1000 m to more than 3000 m asl, 11% inshore below 1000 m asl, and 5% are found at offshore locations.

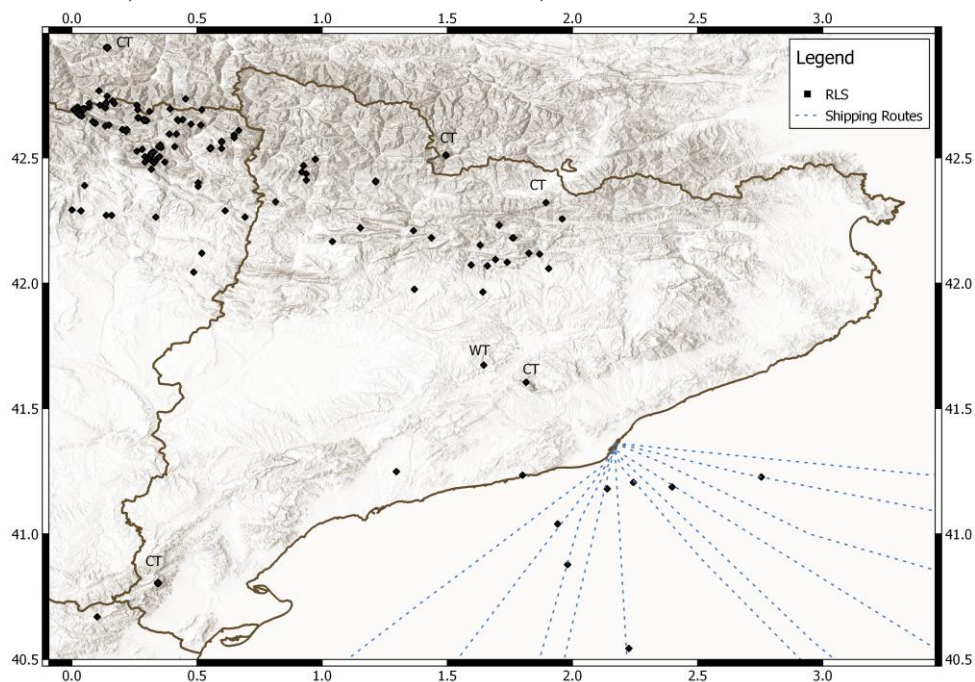


Figure 5-2. Map of RLS locations (diamond symbols) in the studied region centered in Catalonia (Spain). Dataset years 2011-2020. Some RLSs that are communication towers (CT) and a wind turbine (WT) are indicated.

Tall structures like communication towers and wind turbines correspond to 19 (13%) of the 148 RLS. We have geographic data of 203 communication towers in the area; only 6 (3 %) of these towers have resulted to be RLS. Despite the large number of wind turbines (>800), only one appeared as a RLS (Figure 5-2). Why this meager number of RLS related to wind turbines will be discussed later.

We observed many of the RLS are on sharp, pointed mountain peaks. Orographic gradients were computed from a digital elevation model to identify this family of RLS. Based on FAO (2009), the terrain is classified into eight slope gradient classes (Figure 5-3). The overall region in Figure 5-2 has an 18.9 % of steep and very steep terrain categories. The areas occupied by the RLS grid cells fall in ~70 % of these two categories (Figure 5-3).

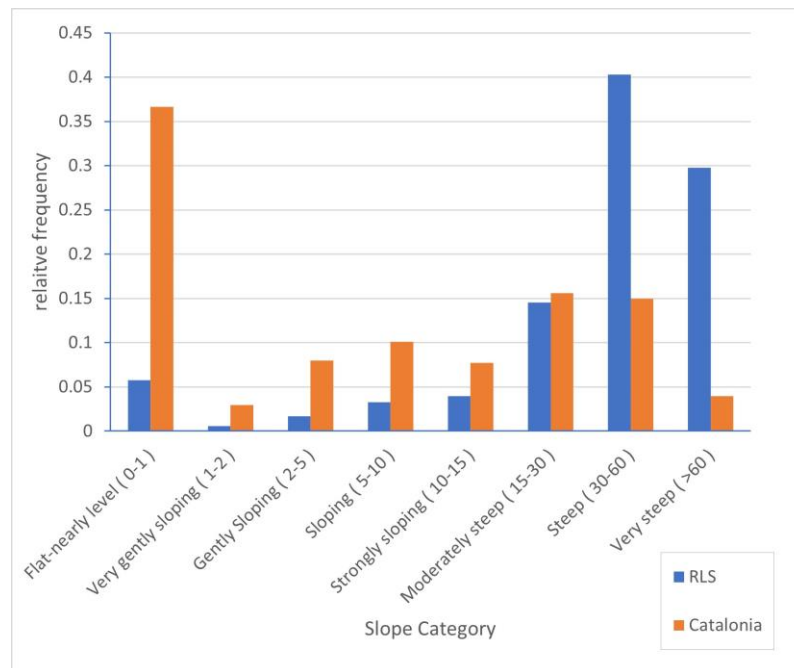


Figure 5-3. Slope classes distribution of the terrain in Catalonia (Spain) and in RLS. In parenthesis percentage of slope gradient.

Note from Figure 5-2 that few RLS are located offshore (~5%), all along shipping routes (dashed lines in Figure 5-2). These RLS are assumed to be true as the calculated randomness of the method has been found to be below 1.2%. Moreover, it would be much less likely that all random RLS offshore would be located just along vessel routes. These singular RLS will be discussed in the next section.

Many RLS appear when the RLS criteria are applied to the second region of interest (Colombia) (see Figure 5-S7 in supporting information). Indeed, the GFD in this region (Figure 5-1b) is of an order of magnitude higher than in Catalonia (Spain), which is reflected in the number of RLS found in this region. Therefore, merely applying the RLS concept alone might not be practical for identifying singular targets such as telecommunication towers. Then, to identify singular RLS in a tropical climate, we have added a peak current criterion. The flashes to targets such as tall structures might be associated with downward negative flashes with return stroke peak currents higher than the median. High median peak currents have been shown by previous works dealing with downward lightning to tall structures (e.g., Visacro et al., 2004 and 2010; Pineda et al., 2018).

Moreover, in the tropics, self-initiated upward lightning in tall structures is less documented, as the conditions to trigger upward lightning can be less favorable due to their different thunderstorm electrical characteristics (e.g. Montanyà et al., 2016). For these reasons, we have analyzed the lightning stroke peak currents to find a new condition for the method to be applied in Barrancabermeja (Colombia) that could highlight singular RLS. Considering that the same type of LSS is used in both regions, we assume that the differences in return stroke currents should be related to external factors like different electrical properties of lightning. To understand that, statistics of return stroke currents for these two regions are investigated. Tables S1 and S2 (in the supporting information) summarize statistics of return stroke peak currents in the three quartiles for each region, including their RLS. In Barrancabermeja (Colombia), the median peak currents (2nd quartile or median) are very similar for the entire region (10.2 kA) and for the RLS candidates (13 kA). Based on the previous discussion about high peak currents of downward lightning to tall structures, we assume that downward lightning at singular locations such as tall towers would tend to present higher return stroke peak currents compared to the median values for the region. A sensitivity analysis was presented, and it is included in supporting information S7. From the analysis, we selected those RLS whose third quartile peak currents are higher than 30 kA. This current threshold corresponds to the inflection of the curve plotted in Figure 5-S9, which represents a significant reduction of the RLS, and it is consistent with the expected presence of high peak current levels of downward lightning flashes in singular locations such as tall towers.

After applying the current filter, 916 RLS resulted (Figure 5-4). These RLS represents 0.087% of the studied area in this region, four times higher than in Catalonia. Thanks to the application of the current filter, several RLS have been identified to be related to tall towers (mostly communication and electric transmission line towers). The lack of geographical information on the location of the towers in this region has limited us to a manual inspection using low-resolution public satellite imagery of Google Earth. Some examples of identified RLS towers are provided in supporting information S5. The other large group of RLS can be related to steep terrain. The same analysis of the slope gradient at the RLS sites previously presented for Catalonia (Spain) has been done for the region of Barrancabermeja (Colombia) and presented in Figure 5-5. In this case, RLSs distribute almost equally for non or moderate-sloping terrain and strongly-sloping and higher-sloping terrain. However, Figures 6 and S8c-d evidence a correspondence of the RLS with steep edges of plateaus, mountain ridges, and peaks.

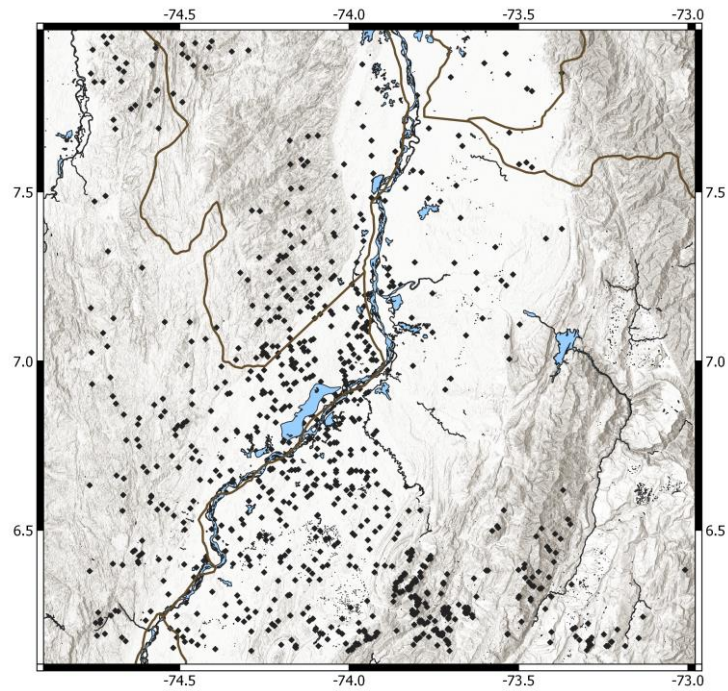


Figure 5-4. Map of RLS locations (diamond symbols) in the region Barrancabermeja (Colombia, South America), obtained with the condition of lightning each year in the cell of 200 m x200 m and the current near the third quartile higher than or equal than 30 kA. Dataset years 2012-2020.

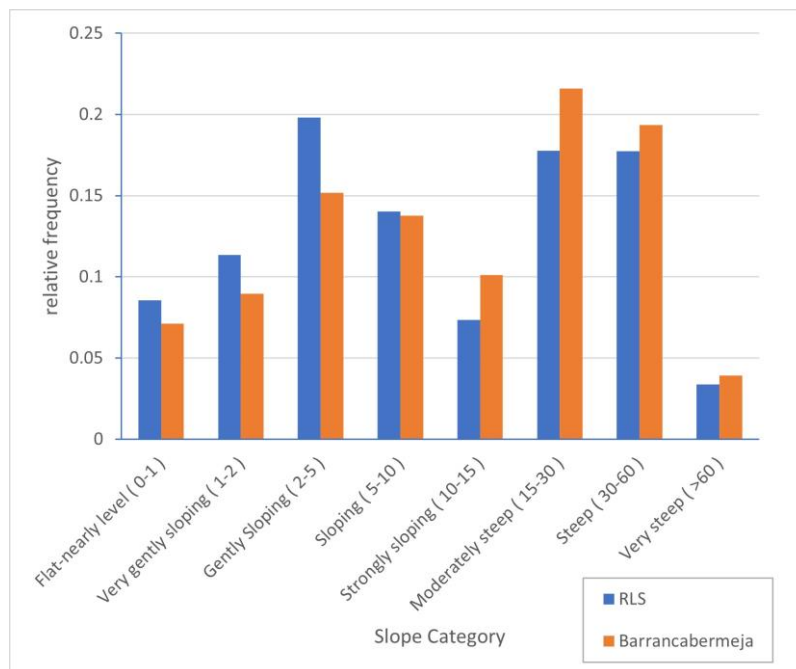


Figure 5-5. Slope classes distribution of the terrain in Barrancabermeja (Colombia) and in RLS. In parenthesis percentage of slope gradient.

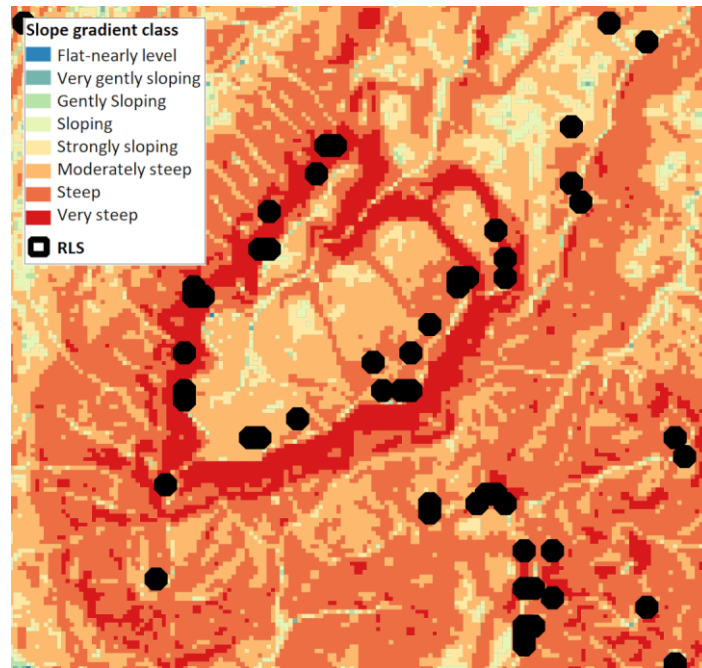


Figure 5-6. RLS located in the steepest terrain in Cerro de armas (1830 m. coords. 6.3301°-73.844°)

Statistics of the altitudes of the RLS in both regions are summarized in Figure 5-7. The median RLS altitude in Catalonia (Spain) is 2400 m asl, whereas in Barrancabermeja stays at 175 m asl. Some RLS in Barrancabermeja are located at higher altitudes, but it can be noticed that those are exceptions. As previously indicated, both regions are similar regarding altitudes above sea level. The influencing factors on these dramatic differences in altitudes of the RLS are treated in the next section.

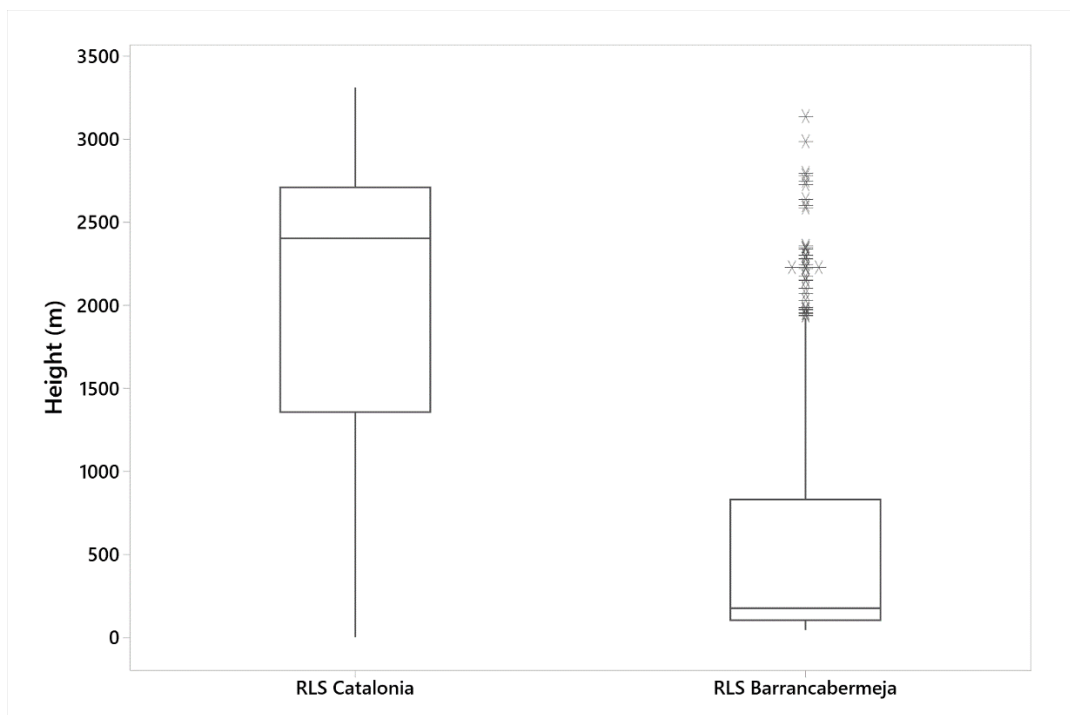


Figure 5-7. Height from RLS from Catalonia (Spain) and Barrancabermeja (Colombia) in boxplots.

5.6 Discussion

5.6.1 RLS and ground lightning flash density

RLS represents a new concept to identify singular locations that receive lightning recurrently with a determined periodicity. This diverges from the classic hotspot concept, defined by the number of lightning events (e.g. GFD or flash rate density). To investigate a possible relationship between RLS and GFD the plots in Figure 5-8 have been created. The figure depicts the distributions of the GFD at RLS (blue bars) and the GFD in the overall region (orange bars) given in Figures 1a and b. As expected, a minimum of GFD exists for the presence of RLS (1.1 and $7.5 \text{ fl} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ for Catalonia and Colombia, respectively). In Catalonia, the RLS are distributed in areas with GFD above the median for the overall region ($1.35 \text{ fl} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$). The median GFD of the RLS ($2.28 \text{ fl} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$) tends toward the maximum GFD of the region ($2.9 \text{ fl} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$). In Barrancabermeja, as in Catalonia, the RLS are inclined to be distributed above the median GFD of the region ($13.8 \text{ fl} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$). The median GFD of the RLS is located at $19.2 \text{ fl} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$, much below the highest GFD of the region ($29.8 \text{ fl} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$). Despite the tendency of RLS to occur in high GFD above the median, the distributions of the GFD at the RLS do not skew toward the highest GFD of the regions, supporting that RLS are not necessarily related to high GFD. RLS reveal, in many cases, the effect of the presence of tall objects or some particular orographic characteristics (peaks, ridges, high slope gradients) that would not be easily identified with the mere analysis of the GFD.

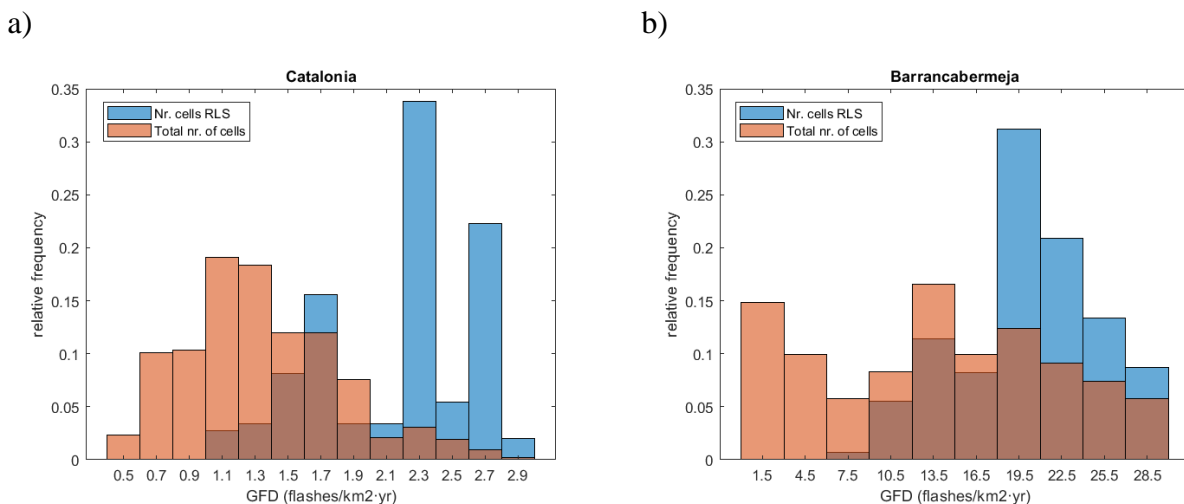


Figure 5-8. Distribution of GFD in all the region (all the cells) and the RLS. a. From Catalonia. b. From Barrancabermeja.

5.6.2 Type of lightning at RLS

In Catalonia (Spain), 13 % of the RLS have been found to be related to the presence of tall objects, and 84 % of the overall RLS are located in mountainous areas belonging to many mountain peaks. Statistics of return stroke peak currents of upward lightning in tall towers in Europe (e.g., Diendorfer et al. 2009; Romero et al., 2013) showed low median absolute values $< 10 \text{ kA}$ compared with the median of the first return stroke of downward flashes (e.g., Diendorfer, 2010 and references therein). On the other hand, first return stroke peak currents in downward lightning to tall structures tend to be larger than the median of the surroundings (Visacro et al., 2004&2010; Pineda et al., 2018).

In Catalonia (Spain), the median peak current level of the RLS strokes (Table S1 in the supporting information) is in the same order as the median of all regional strokes except for those RLS offshore. Despite no clear evidence of significant low peak currents for the RLS related to towers, except a decrease in the 3rd quartile compared with the rest, we assume that most of these RLS are related to upward lightning. Not for the case of the RLS related to mountain regions where the 3rd quartile of the stroke currents presents slightly higher values. In addition, the number of RLS dominated by upward lightning in this region, such as tall towers and wind turbines, might be underestimated because at least 30 % of upward flashes may not contain strokes (or current pulses) above 2 kA (Diendorfer et al., 2011; Hachiya et al., 2008; March 2015). These flashes with low peak currents can be almost undetectable by LLS (CIGRE, TF C4.404A, 2009), so these flashes are not computing for identifying RLS. Moreover, only one RLS related to wind turbines appeared. This poor number might be because wind power installation had been growing over the years, so not all current wind turbines were present during the analyzed period.

The monthly distribution of the lightning activity at the RLS (Figure 5-S10 in supporting information) provides more clues about the type of lightning interactions at these locations. Lightning at RLS with tall objects extends all the year, including winter months when the overall lightning activity in the region is minimum. This is consistent with lightning at other tall towers dominated by upward lightning in Europe (Pineda et al., 2018; Diendorfer et al., 2009; Montanyà et al., 2007). Contrarily, the cases of RLS in mountain regions follow a very similar seasonal pattern as in the rest of the region, suggesting that, in this case, lightning activity is dominated by downward CG lightning. The offshore RLS will be treated later in a specific discussion section.

In the Barrancabermeja (Colombia) region, 16393 locations satisfied the RLS criteria before filtering by current. Once the RLS with currents >30 kA (3rd quartile) have been selected, 916 RLS remained, and it has been easier to identify those related to tall towers and terrain variations, as will be discussed in the next section. In any case, the median peak currents at RLS are higher than over the region (Table S2 in supporting information). In the tropics, we expect that most lightning flashes to tall towers are downward negative flashes presenting higher peak currents than those over the region. These higher peak currents at RLS could be due to the attachment process where the striking distance increases with increasing peak current (Love, 1973; Wang et al., 2013; Tran & Rakov, 2015; Visacro et al., 2017). As a result, downward leaders with higher charge density (Love, 1973; Cooray et al., 2007) could be captured at more considerable distances by a tall structure. So, a tall tower increases the chances of being hit by lightning compared to its surroundings. Since lightning is more frequent in the tropics than in mid-latitudes, the likelihood of downward lightning to a tall tower enhances. Nevertheless, upward lightning from tall structures can also happen in the investigated tropical area. In this case, upward lightning from a tall object would mostly belong to the lightning-triggered upward lightning type (e.g., Smorgonskiy et al., 2015; Schumann, 2018 & 2019). In these upward flashes, peak currents are expected to be low according to experimental measurements (e.g., Araujo., 2012). That means the number of RLS related to tall towers might also be underestimated in the same way as in Catalonia (Spain), due to the undetectable low peak currents involved in lightning-triggered upward lightning flashes (or pulses). In further research, the method presented by Montanyà et al. (2022) employing space-based optical detection to identify flashes that potentially initiate upward lightning from tall structures could be applied to find RLS related to tall towers.

5.6.3 RLS-relate orography

We found many RLS in both regions related to orography: mountain peaks, mountain ridges, and terrain variations in general. Lightning activity affected by orography was treated by Cummins (2012) in the mountains of Colorado and northern New Mexico (USA), where the regions with the highest gradient terrain had the highest ground stroke densities. Some explanations for the increase

in lightning were based on surface-driven turbulence, terrain roughness, height, and variations of the surface electrical boundary conditions. In another work by Holle et al. (2021) on the Grand Canyon, lightning was found in higher elevations and along the Canyon rim. In Vogt and Hodanish (2014), lightning density was studied in the State of Colorado (USA), and, at some altitudes, they found an increase in lightning activity that the authors associated with a steep terrain gradient and an increase in surface-generated turbulence. Also, Bourscheidt et al. (2009) found that in some areas in southern Brazil, lightning density had a linear relationship with the terrain slope. In Colombia, Aranguren et al. (2017) encountered the maximum GFD at altitudes of 1000 m asl and high values of GFD gradient vectors, so the effect of orography was also shown. In the present work, the effect of the orography also appears. In Catalonia (Spain), it has been more evident since ~70 % of the RLS are located in areas with steep and very steep terrain categories according to the classification in FAO (2009). In Catalonia, these areas also have high GFD and thunderstorm days (SMC, 2021). Besides the meteorological effects to favor orthographical convection, mountain peaks, ridges, and high slope gradients strongly influence lightning recurrency. As suggested in the works referenced before, the shape of the terrain and slope variations (e.g. at mountain peaks) may strongly influence the near-surface electric fields, thereby providing areas with higher electric fields competing during downward leader propagation towards the ground or favoring initiation of upward lightning. In the case of Barrancabermeja (Colombia), Figures 6, S8d, and S8e clearly show examples of RLS affected by the steepness of the terrain, such as along the edges of plateaus.

Though both regions have similar orography (valleys and mountains with similar altitudes, see Figure 5-S1), the altitudes of the RLS are very different. While in Catalonia (Spain), the median altitude of the RLS is at 2403 m asl, in Barrancabermeja (Colombia), the median altitude is at 175 m asl. In contrast, high altitudes over 2000 m are outliers in Barrancabermeja (Colombia). This difference is likely due to their different climatology. In Catalonia (Spain), thunderstorms are concentrated in mountainous regions favored by orographic convection and have, in general, a colder atmosphere resulting in thunderstorm electrical charge regions closer to the ground than in the tropics (López et al., 2019). These conditions in Catalonia (Spain) allow downward and upward lightning, particularly in elevated areas. In the tropics, convection is more present thanks to the higher solar heating and moisture. Most global lightning and thunderstorms are located within the Intertropical Convergence Zone. The warmer atmosphere and higher tropopause altitude favor deeper thunderstorms with more elevated electrical charge regions (López et al., 2019). In general, thunderstorm activity all over the Barrancabermeja (Colombia) region is much higher than in Catalonia (Spain). Opposite to Catalonia (Spain), in the considered region of Barrancabermeja (Colombia), low lightning activity is found at higher altitudes, as previously highlighted by Aranguren et al. (2014). In addition, the elevated electrical charge regions in tropical thunderclouds strongly prevent the occurrence of self-initiated upward lightning, as it has not yet been documented in the tropics. As a result, both investigated geographical regions present significant differences in the altitudes of the RLS being affected by their different climatology.

5.6.4 RLS-relate offshore

Surprisingly, some of the RLS in Catalonia (Spain) are located offshore along the shipping lanes of Barcelona. The port of Barcelona is one of the busiest ports in Europe. In the close surroundings of the port, many buoys, as well as anchored vessels waiting for access, are present. Nevertheless, the limits of this area correspond to about 4 km offshore. The identified offshore RLS are located much beyond this distance, suggesting that these RLS might not be related to static elements, if not to lightning strikes to seawater or vessels on route. Increased lightning activity along vessel routes has been recently investigated by Thorton et al. (2017) and Liu et al. (2020), among others. They attributed the lightning increase to aerosol (pollution) effects. Here we cannot directly attribute those RLS to an enhanced lightning activity due to the impact of aerosols. Lightning activity

in these RLS is concentrated in September and October, preferably during the evening and night (see Figures S11 and S12 in supporting information). So, these flashes are mostly related to thunderstorm activity in the Mediterranean during fall. Thunderstorms often develop large stratiform regions associated with mesoscale-convective systems (e.g., van der Velde et al. 2014). These thunderstorms might be convenient for lightning interaction with tall structures (vessels), as Montanyà et al. (2016) pointed out. It is interesting to note that the peak currents in these maritime RLS are higher than over the region, according to Table S1 (in the supporting information). In this case, besides a similar effect as explained before, where peak currents of negative strokes in tall towers tend to present high values, an influence due to the seawater might contribute to these high stroke peak currents. Many works have shown that the estimated return stroke peak currents by LLS over the ocean are higher than over land (e.g., Orville and Huffines 2001; Said et al., 2013; Asfur et al., 2020). Recent works by Asfur et al. (2020 & 2023) suggest that the prevalence of high-lightning peak currents in seawater can be explained by the divergence of total alkalinity from conservation with salinity and relatively acidic conditions in surface seawater.

Further investigations are needed to unravel these maritime RLS's thunderstorms and their lightning occurrence.

5.7 Conclusions

This study has defined the concept of RLS as sites with recurrent CG lightning not focused on the number of lightning events but on the periodicity of occurrence. In this work, we requested at least one lightning flash per year over 10 and 9 consecutive years in the two regions of study: Catalonia (Spain) and Barrancabermeja (Colombia), respectively.

In the Catalonia (Spain) region, 148 RLS have been found. In contrast, in the region of Barrancabermeja (Colombia), 916 RLS resulted after applying a simple return stroke current threshold filter (>30 kA in the 3rd quartile). This filter applied only in Colombia has made singular RLS (e.g., tall towers) more easily identified. The confidence in the given RLS in both regions has been determined by a Monte Carlo analysis where the likelihood of finding a random RLS is below 1.2 %.

The locations of the RLS are not necessarily related to the highest GFD. RLS correspond to GFD above the median for the region, but the distributions are not skewed toward the highest GFD.

In Catalonia (Spain), 13 % of the RLS have been related to telecommunication towers and one wind turbine. 84 % of the overall RLS are in mountainous areas, whereas 5 % are offshore. We assume that lightning at RLS related to tall towers is dominated by upward lightning. This assumption is supported by the statistics of the stroke peak currents similar to those of the region with a decrease in the 3rd quartile and by the seasonal distribution of lightning occurrence all over the year, including winter. Contrary lightning at RLS in the mountain regions is distributed very similarly over the months as the lightning activity in the overall region. In addition, statistics of return stroke peak currents do not differ from the ones of the region. So, we assume that downward CG lightning dominates y in these RLS.

In Catalonia (Spain), the number of RLS related to upward lightning from towers and wind turbines might have been underestimated because it is well known that some portion of upward flashes only produce very low peak currents of strokes (or pulses) that are undetectable by LLS systems. In addition, in the case of wind turbines, only some of the present installed generators existed during the 10-year period.

In Barrancabermeja (Colombia), statistics of lightning return stroke peak currents at the RLS suggest that CG lightning activity in these sites is dominated by downward lightning. We found some RLS related to tall towers and some to steep terrain. The RLS method provides a powerful tool to identify which tall structures are most affected by lightning in a tropical climate where the mere GFD does not highlight these sites. Unfortunately, we could not access the geographical information of towers in the region, and the low resolution of public satellite imagery in this area has limited the extension analysis.

We found that many RLS could be related to some orography characteristics. In Catalonia (Spain), ~70 % of the RLS are located in areas classified as steep and very steep terrain (e.g., mountain peaks). In Barrancabermeja (Colombia), many RLS have been related to steep terrain, such as mountain peaks, ridges, and steep edges of plateaus. In Catalonia (Spain), the highest lightning activity is in the mountain zones. These areas favor orographic convection and so, thunderstorms, and also upward lightning. Whereas in Barrancabermeja (Colombia), thunderstorm activity is much higher than in Catalonia (Spain) and in a warmer atmosphere with higher thunderstorm electrical charge regions favoring mostly downward lightning. These differences are also shown in the analysis of the altitudes of the RLS sites. In Catalonia (Spain), the median altitude of the RLS is 2403 m asl, whereas, in Barrancabermeja (Colombia), the median is at only 175 m.

Surprisingly, 5 % of the RLS in Catalonia (Spain) have been identified offshore along the shipping lanes of Barcelona. The distance of these RLS to the coast suggests that these might not be related to buoys or anchored vessels; if not, they are more likely to be related to vessels on route. The return stroke peak currents in these RLS are higher than in the overall region (mostly land). These high return stroke peak currents could be due to the effect of the attachment of downward leaders by tall structures (vessels in this case) or to seawater properties compared to land.

The new concept of RLS could be of interest to activities directly affected by lightning, such as wind energy, communication towers, or transmission and distribution of electric power systems. RLS can be quickly adopted as part of risk assessment and preventive maintenance. Undoubtedly, the information about RLS will be attractive to insurance companies.

Acknowledgments

This work was also supported by research Grant ESP2017-86263-C4-2-R funded by MCIN/AEI/10.13039/501100011033 and by “ERDF A way of making Europe”, by the “European Union”; and Grants PIDP2019-109269RB-C42 and ENE2017-91636-EXP funded by MCIN/AEI/10.13039/501100011033.

The authors are grateful to Keraunos SAS (Colombia) for providing lightning data of LINET in Colombia and to Nowcast GmbH (Germany) to provide data of LINET in Spain.

Open Research

Data supporting the conclusions are available at: a Zenodo or a Harvard database link will be provided.

5.8 Supporting Information from manuscript submitted to Journal of Geophysical Research: Atmospheres

Supporting Information for

Recurrent Lightning Hotspots: Where Lightning Strikes More than Twice

G. Sola¹, J. A. López¹, J. Montanyà¹, N. Pineda^{2,1} and E. R. Williams³

Contents of this file

Text S1 to S7

Figures 5-S1 to 5-S11

Tables S1 to S2

S1. Similar orography from both regions with markedly different GFD

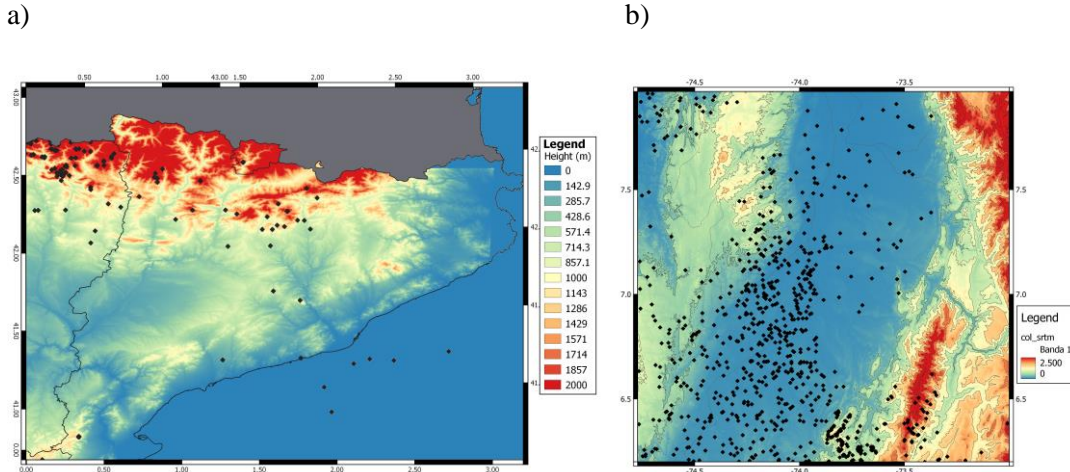


Figure 5-S1. Elevation maps with RLS (black dots) in: a) Catalonia, b) Barrancabermeja. Both regions have similar altitudes and zones of valley and mountains. GFD grid 3 km x 3 km.

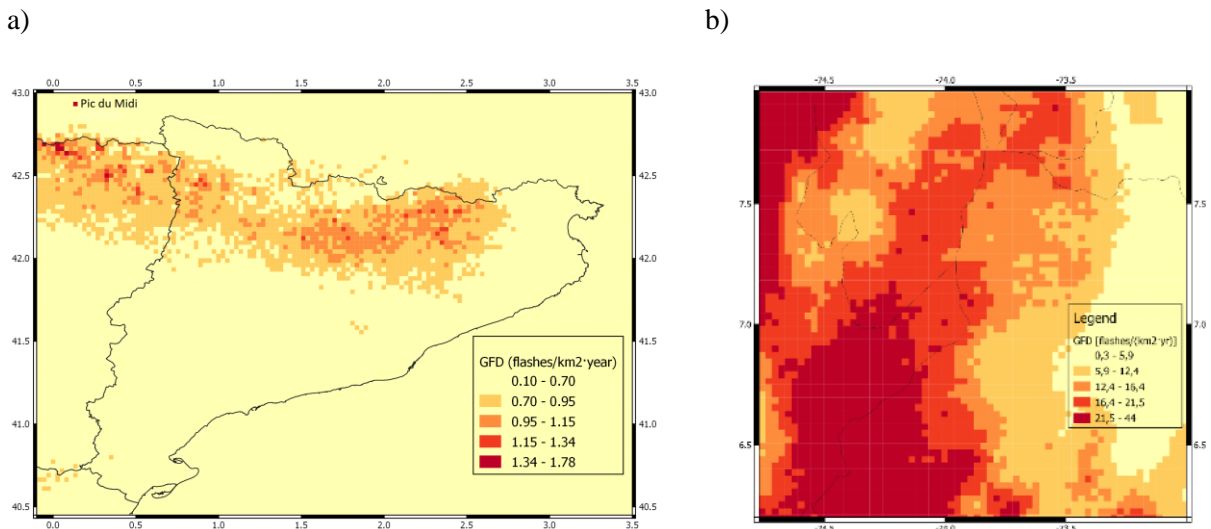


Figure 5-S2. a) Map from the GFD in Catalonia (3 km grid) with LINET data 2011-2020. b) Map from the GFD in Barrancabermeja (Colombia) (3 km grid) with LINET data 2012-2020.

S2. Sensitivity analysis of the grid size for computing RLS

With the lightning data of 2 km around of three RLS in Catalonia, we find the annual average ground stroke density (strokes·km⁻²·yr⁻¹) with different area sizes, represented in Figure 5-S3. The graphics show that below 1 km area size, the effect of higher density from the surrounding area is there. There is a high lightning density, but over 1 km the lightning density is similar to the surrounding region around. This also demonstrates that, for this kind of study, a very good location accuracy (suggested 200 m) is important, to detect this higher density.

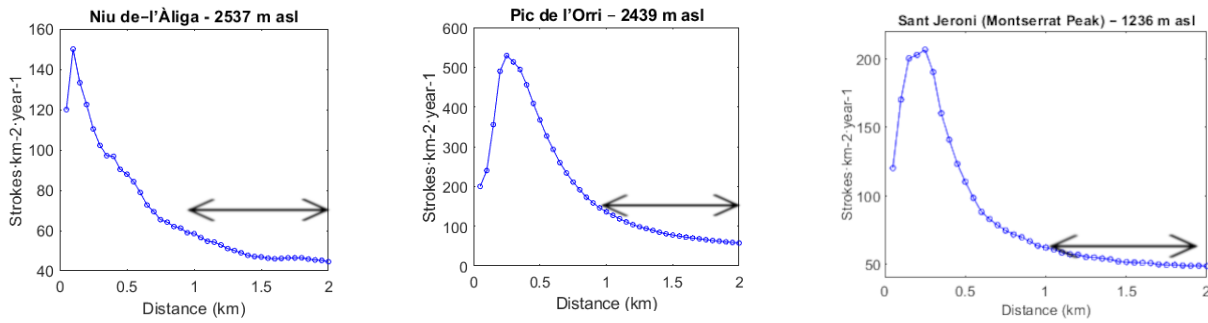


Figure 5-S3. Annual average ground stroke density ($\text{strokes}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$) with different area sizes (from 0.1-2 km) in three RLS in the Catalonia (Spain) region. Arrow indicates the zone where stroke density is the same from the region around when area size is higher than ~ 1 km.

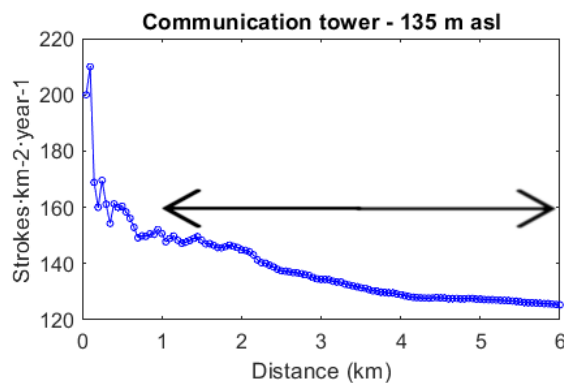


Figure 5-S4. Annual average ground stroke density ($\text{strokes}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$) with different area sizes (from 0.1-6 km) in a RLS in the Barrancabermeja (Colombia) region. Arrow indicates the zone where stroke density is the same from the region around when area size is higher than ~ 1 km.

S3. Probability of finding an RLS by random chance

We took 10×10 km² area that include one or more RLS in a flat and uniform terrain in the center of Catalonia and another in Barrancabermeja and we assumed that the GFD was constant. With a Monte Carlo model that followed a uniform distribution for flashes and year when occur in the 10 years, that had GFD and the grid box area fixed, we estimated the random probability of finding an RLS in Catalonia with the selected grid of 400 m x 400 m as 1.01 % and in Barrancabermeja with a grid of 200 m x 200 m as 0 % (see Figure 5-S5). The current filter in Colombia would made that the chance of finding a random chance RLS in the mentioned estimation would be even lower. However, as this probability is 0%, it remains the same value.

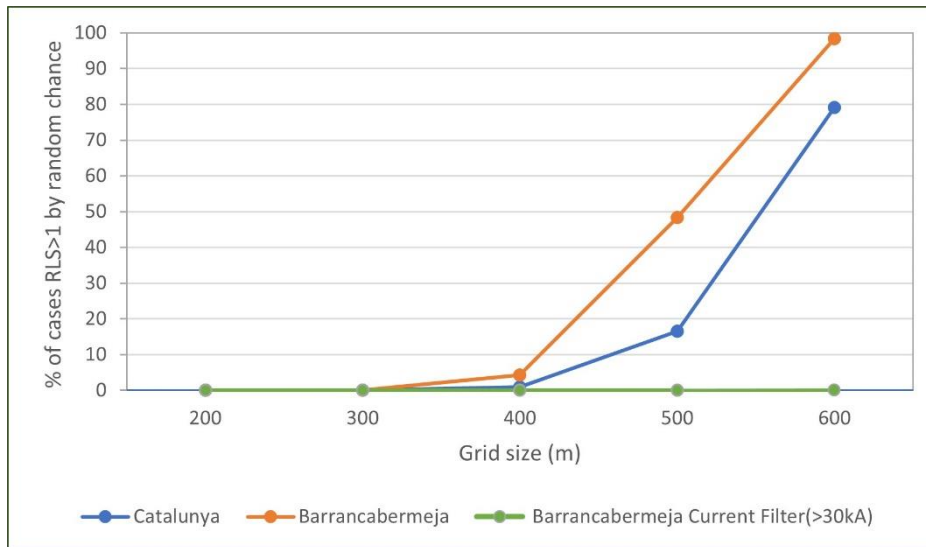


Figure 5-S5. Percentage of cases with at least 1 RLS depending on grid size when the lightning is struck by random chance.

S4. RLS in Catalonia

a)



b)



c)



d)



e)



f)



Figure 5-S6. a) Some RLS in Catalonia. b) 1-Pic de l'Orri antennas (1436 m, coords. 42.408, 1.215). c) 2-

Pic du Midi Observatory (2876 m.,coords. 42.967, 0.141). Wikipedia. d) 3-Wind turbine from Rubió Windfarm (827 m ,coords. 41.673, 1.645) Google Earth. e) 4-Geographical landmark at Pico Cotiella, (2863 m, coords. 42.512, 0.319) Google Earth. f) 5-Espadas peak (3255 m, coords. 42.651, 0.427) Google Earth.

S5. Current statistics

Table S1. Current statistics of all strokes all over Catalonia (Spain) and at RLS. Currents are absolute values in kA.

	Region	Catalonia (Spain)			
		All RLS	RLS tall towers	RLS mountains	RLS offshore
1 st quartile (25 %)	8.1	8.3	8.4	8.1	9.5
2 nd quartile (50 %)	11.4	11.6	11.4	11.6	13.5
3 rd quartile (75 %)	17.2	19	16	18.8	26.7

Table S2. Current statistics of all strokes all over Barrancabermeja (Spain) and at RLS without any current filter applied and with the >30 kA (3rd quartile) filter applied. Currents are absolute values in kA.

	Region	Barrancabermeja (Colombia)	
		All RLS	All RLS with current filter applied
1st quartile (25 %)	7	9.2	9.5
2nd quartile (50 %)	10.2	13	16.5
3rd quartile (75 %)	17.2	21.6	34.5

S6. RLS in Barrancabermeja

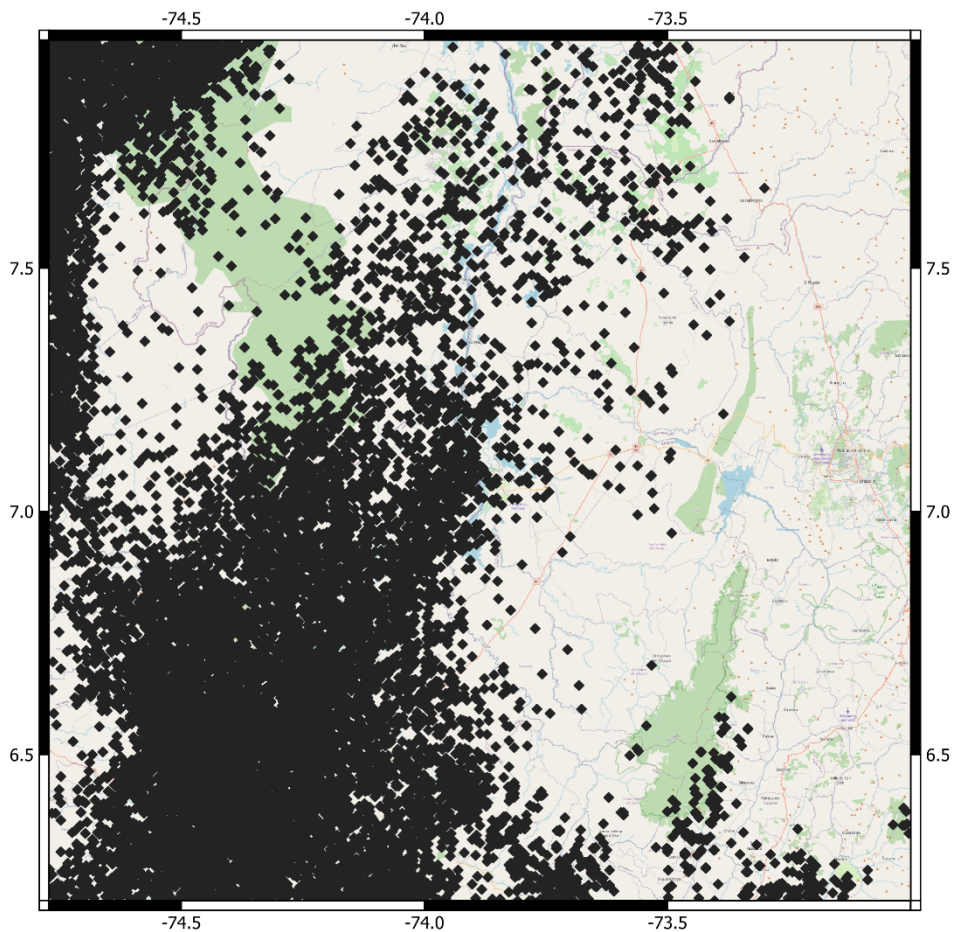


Figure 5-S7. There are 16323 RLS (from 1057602 cells in the region) that receive lightning every year in Barrancabermeja (Colombia) without any current filter.

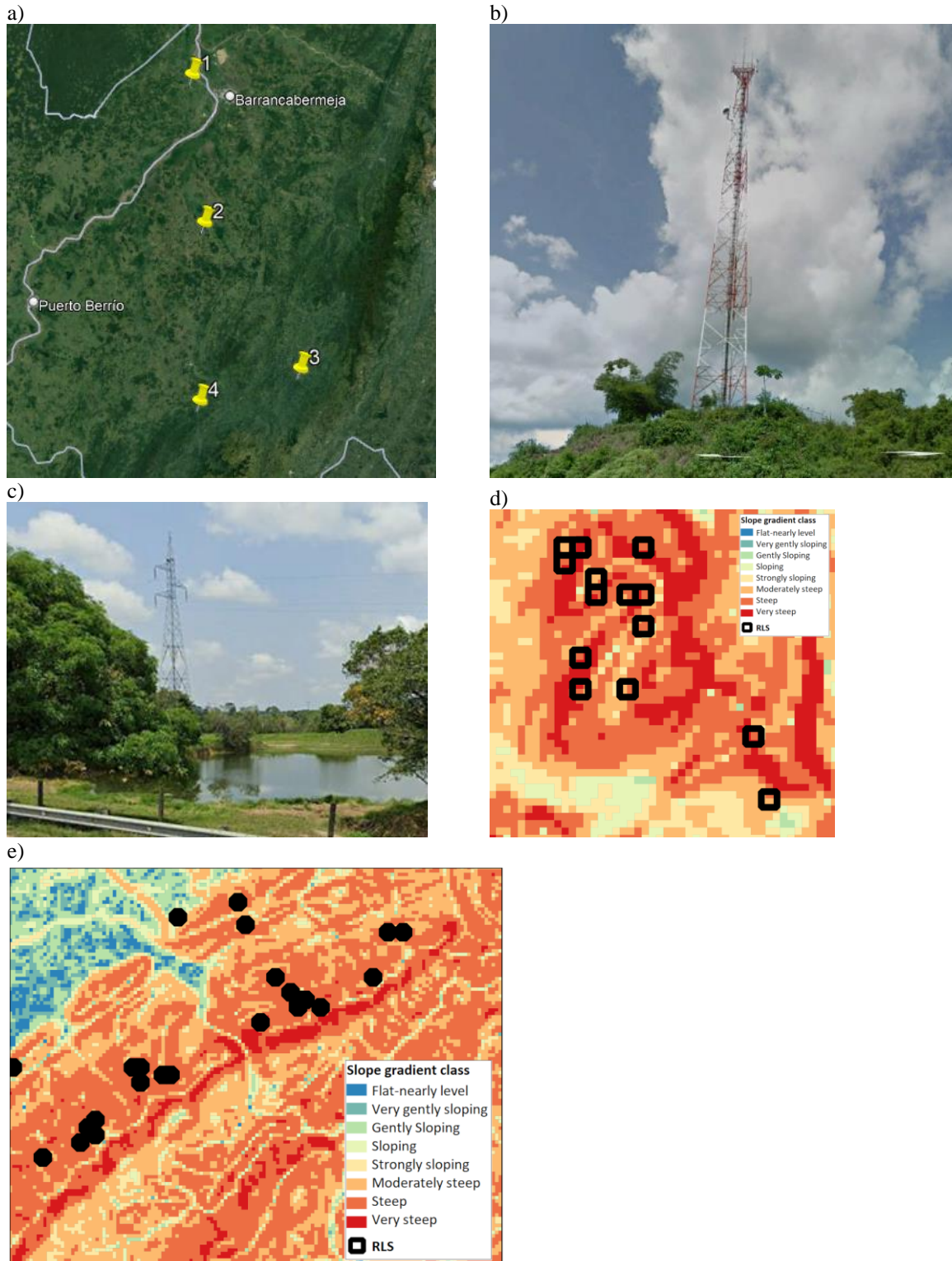


Figure 5-S8. Figure 5-S8. a) Some RLS in Barrancabermeja. b) 1-Communication tower (90 m. cords 7.089322 -73.953454). Google Earth. c) 2-Pylon. coords. 6.675704° -73.921174°. Google Earth. d) 3-Mirabuenos, La Paz, Santander. (1308 m, coords. 6.2680 -73.6539) e) 4-Mountain chain in Santander Dpt. (1100 m, coords. 6.1792° -73.9358°)

S7. Peak current filter

Sensitivity analysis of how many RLS candidates in Barrancabermeja (Colombia) region have the third quartile (75% of the values) of the currents from the lightning inside the box higher than a certain current value (0 to 60 kA). It shows an inflexion above 30 kA that represents a significant reduction of the RLS candidates, that coincides with the expected high current values compared to the median peak currents for the regions of negative CG to tall towers (Visacro et al. 2017; Pineda et al., 2019). This current threshold is very close to 3rd quartile (75%) of the initial RLS candidates, as summarized in the Table S2.

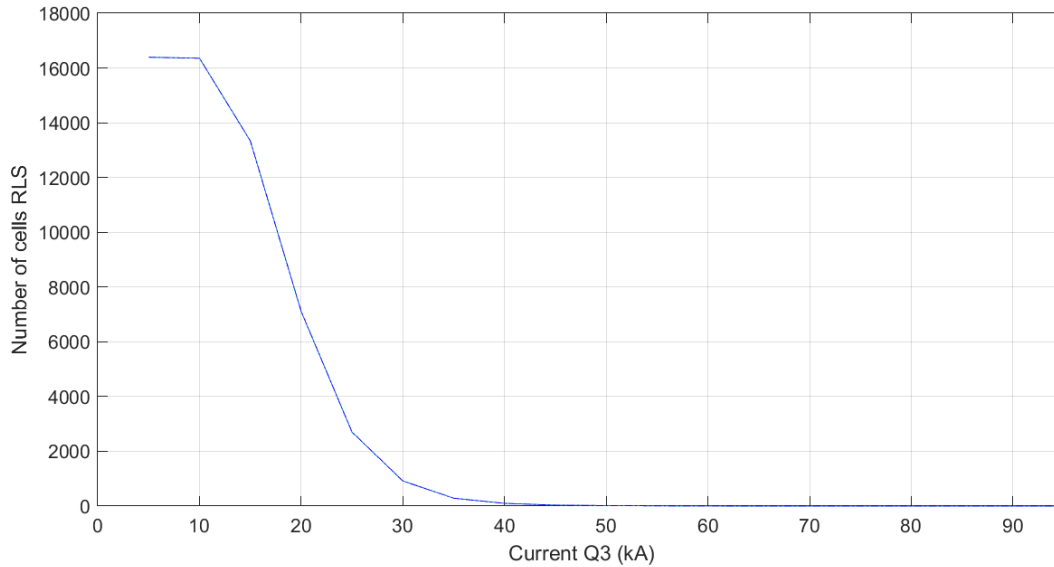


Figure 5-S9. The sensitivity analysis of the number of RLS versus a peak current threshold from 0 to 60 kA from the currents in the third quartile from every RLS candidate in Barrancabermeja (Colombia) region.

S7. Annual distribution of lightning in the RLS of Catalonia

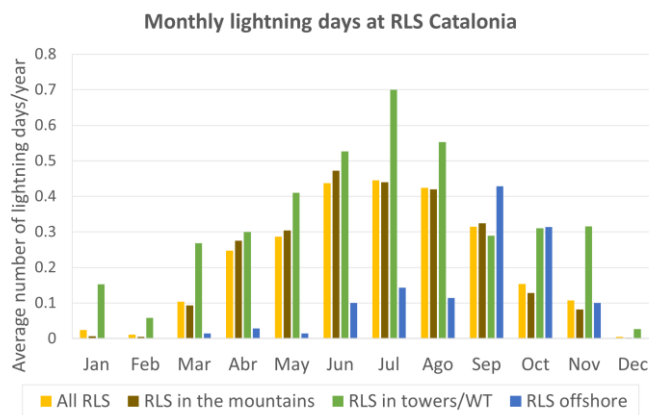


Figure 5-S10. Monthly distribution from lightning days in the RLS from Catalonia, separating those on the mountains and those on the coast.

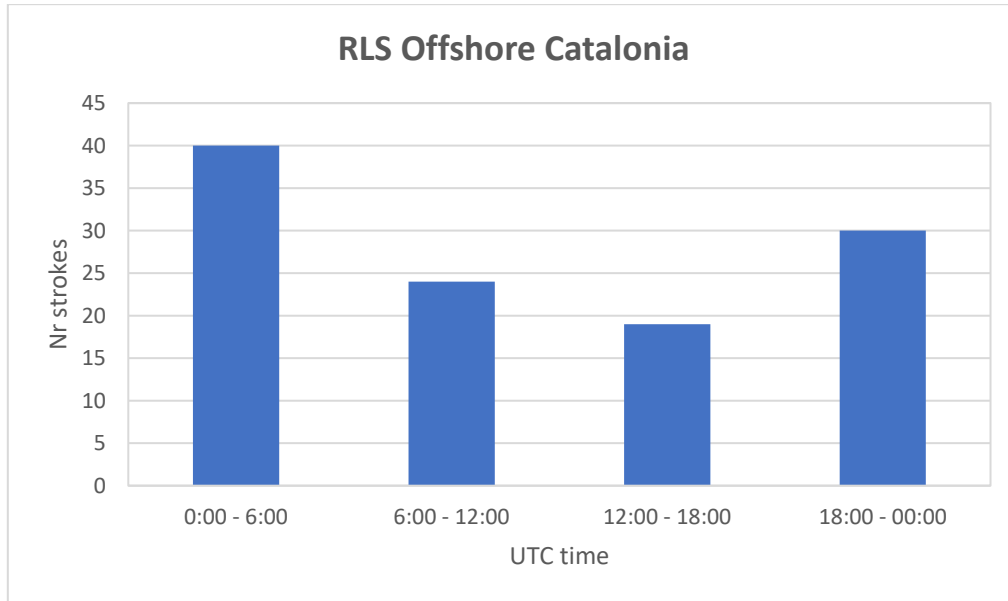


Figure 5-S11. Diurnal distribution of offshore RLS in Catalonia.

6 Caracterización de rayos que afectan aerogeneradores

El sistema de protección contra al rayo en aerogeneradores es un desafío, pues son estructuras altas muy expuestas, cuyas palas están fabricadas con materiales composites. Estas estructuras pueden iniciar el rayo, tal como se ha explicado en el capítulo 2 de esta tesis. También en el capítulo 5 se ha visto que concentran una mayor actividad de rayos a su alrededor y se ha encontrado que en algunos casos también son RLS. En este capítulo se estudian los datos de rayos detectados más cercanos a aerogeneradores relacionados con incidencias. Los datos de rayos proceden de LINET, el LLS cuya instalación se ha descrito en el capítulo 3.

6.1 Introducción

Este capítulo recopila la información de rayos relacionada con 39 casos de incidencias con aerogeneradores de 2008 a 2022 en España.

Las empresas eólicas utilizan información de datos de rayos para hacer informes de análisis de causa-raíz para comprobar que el daño fue causado por un rayo, qué día ocurrió, corriente, etc. Se recogieron los datos de cada caso y se analizaron, para caracterizar los rayos que causaron estos daños y poder entender mejor su tipología con el fin de mejorar la prevención frente al rayo en aerogeneradores. Este enfoque del estudio de relacionar los datos de rayos obtenidos a partir de un sistema de localización de rayos con aerogeneradores relacionados con incidencias es novedoso en la literatura científica.

Los aerogeneradores son estructuras elevadas, que, por su altura, al igual que las torres que, como indica Berger (1967), las de más de 100 m de altura son expuestas a fuertes campos eléctricos locales bajo las nubes de tormenta. Si, además, las estructuras elevadas están situadas en una cima de montaña, su altura efectiva aún se considera superior a la altura propia de la estructura (Rizk, 1990; Rachidi et al. 2008). Otra característica es que las palas las tienen en rotación, según Pineda et al. (2008) casi el 40% de su altura gira y varios estudios sugieren que esta rotación hace más susceptible el impacto de rayos (Rachidi et al. 2008; Wand y Takagi, 2012; Montanyà et al., 2014). Por lo que en general un aerogenerador tiene más probabilidad de ser impactado por un rayo (Rachidi et al., 2008; Wand y Takagi, 2012).

Las palas están formadas por materiales como poliéster o epoxy reforzado con fibra de vidrio y también se utiliza fibra de carbono o aramidas (Kevlar) como material de refuerzo. Este tipo de materiales dificultan el buen funcionamiento del sistema de protección frente al rayo (*lightning protection system*, LPS), ya que no presentan una conductividad homogénea generando caídas de potencial peligrosas, resultando en incidencias

cada año que representan costes significativos de reparación y mantenimiento, y también pérdida de rendimiento de producción eléctrica (Braam et al., 2022; Garolera et al., 2014; Montanyà, 2016; March, 2016).

En consecuencia, la normativa de protección frente al rayo de aerogeneradores (IEC 61400-24) ya prevé un cálculo de riesgo de frecuencia anual de rayos que afectan un aerogenerador, de manera que se admite que en un porcentaje que depende principalmente de la ubicación y el número de rayos de la zona, el LPS puede no ser efectivo. Los fabricantes de LPS han de cumplir con una protección contra el rayo establecida por el LPL (*lightning protection level*), que delimita el rango de amplitud de corriente del rayo que protege su sistema, definida en el estándar IEC 62305-1.

Cuando hay un aerogenerador que ha sufrido algún tipo de incidencia compatible con un rayo, se solicita una petición de datos de rayos de los posibles días en los que ha podido suceder la incidencia. Algunas veces, se tiene registro de en qué momento la turbina eólica dejó de funcionar, que suele coincidir con un impacto de rayo, pero a menudo cuando hay un daño por rayo en una pala, no impide su rotación, y entonces la rotación continua aumenta y agravia el daño en la pala, tal como explica Matsui et al. (2022). Por este motivo, no se percibe que ha habido daños hasta que hay una inspección visual de las turbinas del parque, proceso que depende de la operativa de mantenimiento y que es difícil de llevar a cabo si hay mal tiempo; o bien hasta que la máquina deja de funcionar completamente, que puede ser unos días después del impacto de rayo. En este caso, la máquina para cuando se ha producido un daño más severo que el inicial, fruto del continuo funcionamiento con un daño existente.

Por eso la normativa (IEC 61400-24) recomienda el mantenimiento preventivo. De esta manera, cuando se detectan rayos alrededor de una turbina, se realiza una inspección visual y se comprueba que no ha habido repercusiones. En el caso de encontrar alguna afectación, se puede reparar antes de que sea más grave.



Figura 39. Rotura de palas por rayo en aerogenerador. (Adaptado de Montanyà et al., 2014).

6.2 Datos y metodología

Se han seleccionado datos de rayos de 39 casos de incidencias en aerogeneradores entre 2007 y 2022 en España, en territorio peninsular. En estos casos sabemos con seguridad que ha habido algún tipo de incidencia compatible con rayo. Para cada caso se seleccionó la ubicación del aerogenerador y el periodo en el que sucedió la incidencia. A partir de las coordenadas del aerogenerador, se determinó la altura sobre el nivel del mar. Con esta ubicación y con la información del mapa de la Asociación Empresarial Eólica, se obtuvo el modelo de turbina. A través de la base de datos de Bauer y Matysik (2023), con el modelo de turbina, se extrajo la altura del buje y el diámetro de la pala, para calcular la altura efectiva de la turbina según la norma IEC 61400-24, (ver Figura 40). La altura efectiva considera la altura de la turbina (bujes más medida de la pala) añadiendo la altura relativa del terreno. El cálculo de esta altura relativa del terreno no es sencillo, la norma IEC es ambigua y no define cómo encontrar esta altura. Zhou et al. (2010) propusieron un método llamado el “Rizk model method”, como se explica en el capítulo 2.3, pero resulta complicado de aplicar. En todos los casos se ha considerado que la altura del terreno era la altura sobre el nivel del mar, como referencia.

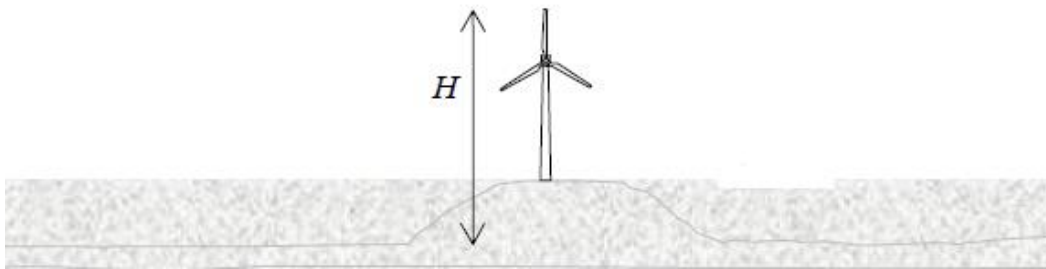


Figura 40. Altura efectiva (H) de una turbina. (Adaptado de IEC 61400-24).

Los datos de rayos que se han utilizado son los del LLS de LINET en España, descrita previamente en el capítulo 3. Para cada rayo se ha seleccionado: coordenadas, día, hora, minuto, segundo, amplitud de corriente, tipo (CG o IC).

En cada uno de los casos se ha buscado el rayo más cercano al aerogenerador afectado dentro del periodo que indicaban que sucedió la incidencia. En algunos casos el periodo de tiempo es muy ajustado, pues se conocía la hora de la incidencia; en otros el periodo son unos días; y, en algunos otros, no se tenía la certeza de cuando sucedió y el periodo comprende desde la última inspección visual hasta que se detectó.

En las estructuras elevadas como los aerogeneradores, la estacionalidad influye en el tipo de rayos que las afectan, tal como se ha visto en apartado 2.3. Primeramente, se utilizó un criterio más sencillo para separar por meses cálidos y fríos, siguiendo la clasificación de March (2017), donde se considera que, en el hemisferio norte, los meses cálidos donde hay tormentas convectivas es de abril a septiembre y el periodo de tormentas no convectivas de octubre a marzo.

Otro ajuste más elaborado es considerar el tipo de tormenta según parámetros de temperatura y presión de la atmósfera. Krehbiel (1986) y Williams (1989) correlacionan la altura de los centros de carga eléctrica de la

nube de tormenta con el perfil de temperatura. Las nubes de tormenta tienen una estructura eléctrica con capas de polaridad opuesta (ver capítulo 2.1.1) y la localización de estas capas depende de la altura de las isotermas. Tal como explican Macgorman y Rust (1998), la capa de fase mixta de la nube de tormenta que es donde hay las partículas de hielo y una convección energética necesaria para iniciar rayos, se delimita entre alrededor de los -40°C , donde se encuentra la capa positiva superior de la nube, y entre -10 y -25°C se encuentra la capa inferior negativa. En el estudio de Pineda et al. (2018), ubicado en el sur de Cataluña (nordeste de la Península Ibérica), indican que se espera actividad de rayos en celdas de tormenta superiores la isoterma de -10°C , y que las que llegan a la isoterma de -40°C indican una fuerte convección con rayos de intensidades elevadas. La capa inferior negativa da una referencia de si las nubes corresponden a una nube de tormenta alta, resultante de fuerte convección, que se encontrará a más altura (o a menor presión) o, como en los casos de los rayos de invierno, esta temperatura está en alturas más bajas (o a mayor presión). Si a 700 hPa de presión atmosférica la temperatura es igual o inferior a -10°C es el criterio utilizado para elaborar mapas de actividad de rayos de invierno, tal como muestra Montanyà et al. (2016).

Con este fin, se consultó el ERA5 (Hersbach et al., 2020), un modelo que hace una reanálisis integral de una gran cantidad de observaciones climáticas atmosféricas, terrestres e hidrológicas desde 1940 hasta día de hoy. Concretamente, en ERA5 se reprodujeron, en la fecha y hora de suceso del rayo más cercano de cada uno de los casos evaluados, las temperaturas que tenían las isobaras de la zona a 300 hPa y 700 hPa, para tener más información del tipo de tormenta.

6.3 Resultados y discusión

La distancia entre el rayo detectado más cercano y el aerogenerador se pueden observar en la Figura 41. En la mayor parte de los casos el rayo se detectó a menos de 1 km. Esto se debe a que el LLS utilizado, LINET, tiene una alta precisión de localización en esta zona: 150 metros de media. En los casos en los que el rayo se encontró más alejado hay varias hipótesis, ya que se desconocen detalles de los daños concretos que pudiesen dar más información sobre lo que sucedió:

- a) En casos de rayos cercanos, se podría tratar de efectos indirectos. El rayo puede haber impactado en una línea o transformador cercano a la turbina y se hayan producido sobretensiones debidos a ellas.
- b) La red no ha detectado el rayo, como pasa en ciertos casos de rayos ascendentes con baja intensidad en la que hay corriente continua. La forma de onda de corriente de este tipo de rayos no muestra pulsos de corriente de pico alto y de rápido aumento como las típicas descargas de retorno de rayos descendentes CG. Según estudio de Diendorfer (2015), en una serie de eventos ascendentes en una torre de Austria, sólo el 43% fue detectado por un LLS competente.
- c) No ha habido rayo, pero sí líderes ascendentes, fenómeno que observaron en Montanyà et al. (2014), Wang y Takagi (2012). Estos líderes ascendentes al no producir una RS, no los detectan las redes de detección. Según March (2017), los datos de un LLS no reflejan todos los rayos ascendentes que ocurren en los aerogeneradores.

- d) A pesar de que hubo tormenta eléctrica a unos kilómetros de distancia del aerogenerador, no impactaron rayos en el aerogenerador y con la petición de datos de rayos se descarta que el daño fuese causado por un rayo.

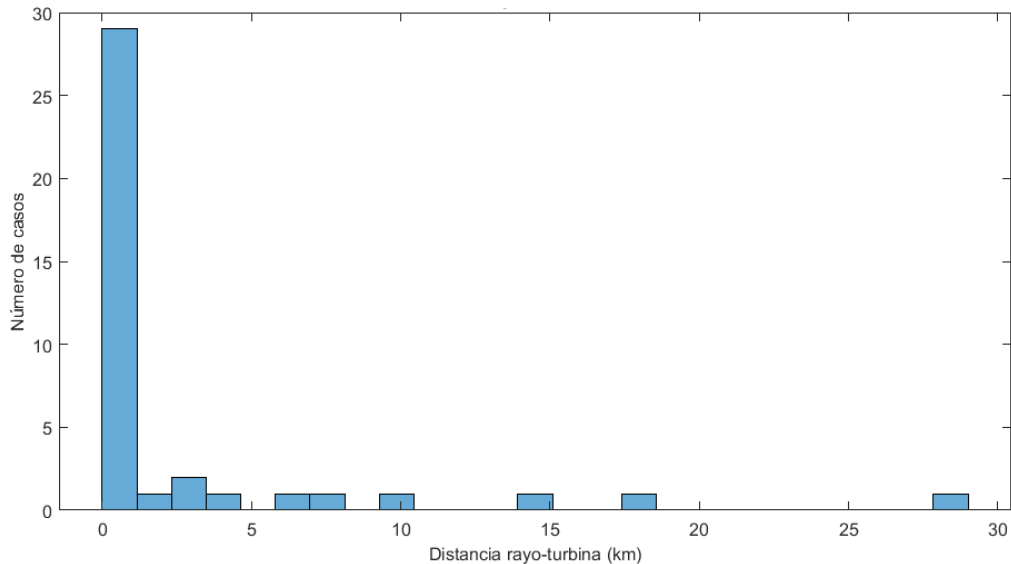


Figura 41. Distancia a la que se ha detectado el rayo respecto el aerogenerador.

Desde que el rayo impacta el aerogenerador hasta que se reporta la incidencia, puede pasar poco tiempo porque ha quedado registrado o porque paró. Sin embargo, a veces el daño no impide su funcionamiento y hasta que no hay una inspección visual o hasta que la incidencia no se agrava por el movimiento de rotación, no se detecta la avería por rayo. En la Figura 42, se representa este número de días y se observa que la mayoría (67 %) tienen bien identificado cuando sucedió, pues el rayo se encuentra en los 3 días anteriores. Una cuarta parte de los casos requiere buscar el rayo en un periodo superior a los 8 días desde que se reporta la incidencia.

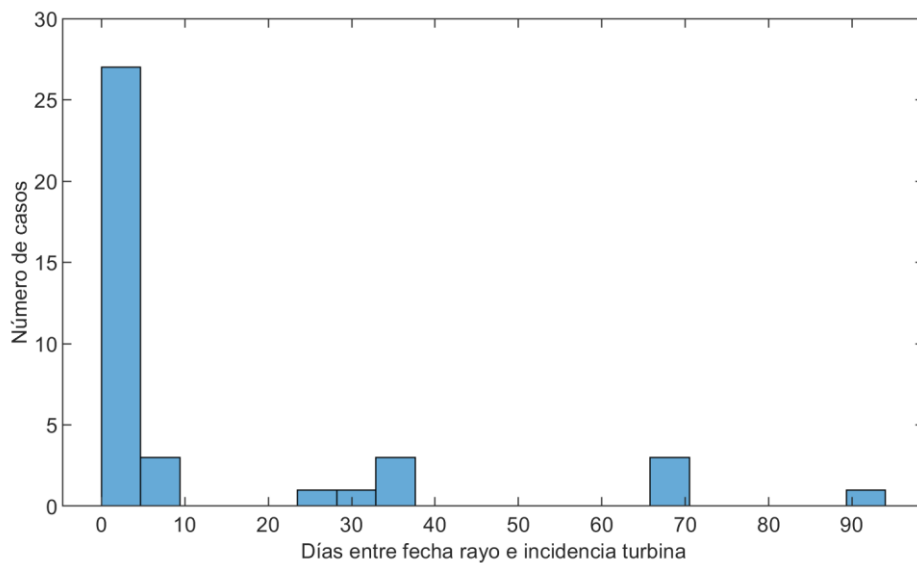


Figura 42. Días que han pasado entre el evento y la detección de la incidencia en la turbina

Al evaluar la altura efectiva de la turbina de los casos, la mayoría se encuentran entre 300 y 1200 m sobre el nivel del mar (Figura 43).

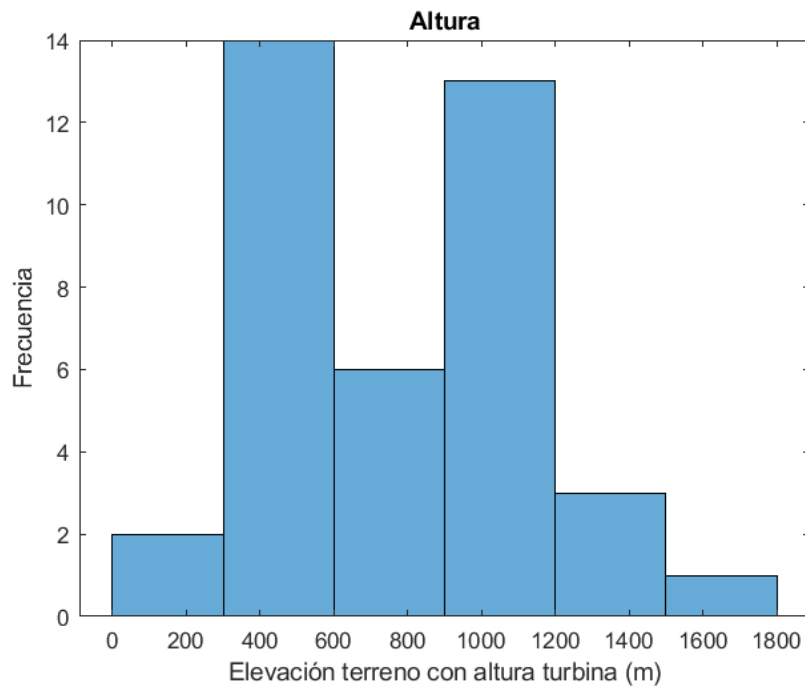


Figura 43. Altura efectiva de las turbinas.

Como referencia, se ha encontrado la elevación de los parques eólicos de España. A partir de las coordenadas del mapa publicado en el portal web La GISteria (2023) (representados en la Figura 44) se buscaron las alturas de la elevación del terreno con Google Earth Maps y se reflejan en los gráficos de la Figura 45. Ambas distribuciones de las elevaciones de los parques coinciden bastante, la mayoría entre 500 y 1100 metros de altura, aunque en los parques de todo el territorio la mayor parte está alrededor de 100 m y en los casos del estudio alrededor de los 500 m. Podríamos destacar que hay pocos casos en el estudio de turbinas afectadas por encima de los 1100 m de elevación del terreno. Si se compara con las alturas obtenidas en los RLS de Cataluña, tratados en el Capítulo 5 de esta tesis, donde la media de elevación estaba en 2403 m sobre el nivel del mar, probablemente estas turbinas, aunque hayan sufrido impacto de rayo, no se corresponden con las alturas de los RLS. Tal como se desarrolló en el Capítulo 3, las turbinas eólicas concentran una GFD mayor que sus alrededores, pero sólo algunas cumplen con el criterio de recurrencia de rayos año tras año para ser RLS.

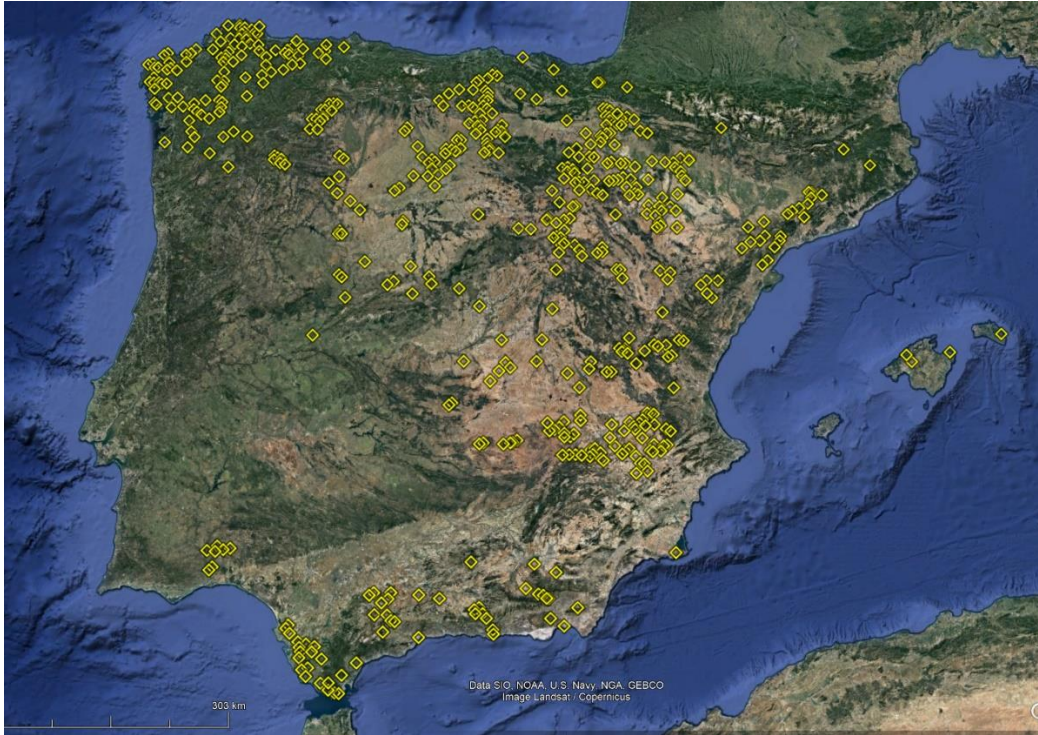


Figura 44. Ubicación parques eólicos en España en Google Earth Maps a partir de datos del portal web La GISTería (2023).

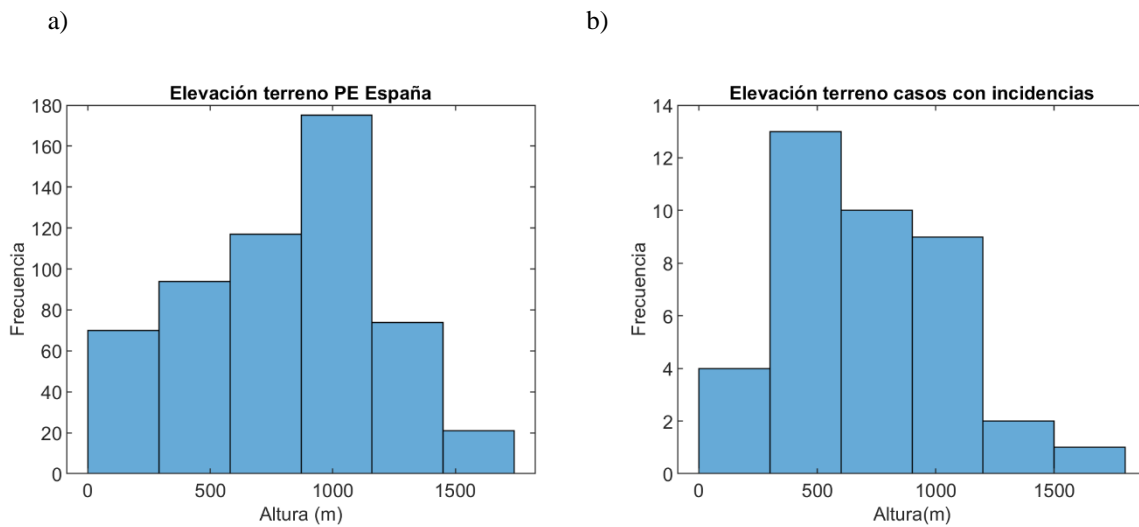


Figura 45.a) Elevación del terreno de los Parques Eólicos de España. b) Elevación del terreno de las turbinas afectadas por rayos.

Los valores de amplitud de corriente de los rayos detectados cerca de las turbinas son inferiores a los 30 kA en un 67% de los casos. Aunque existen algunos casos de muy altas corrientes, según se muestra en la Figura 46, la mayoría se encuentran por debajo de los 15 kA. Respecto a la polaridad de las corrientes de estos rayos, el 51% tiene polaridad negativa frente al 49% de polaridad positiva. Hay un caso en que el tipo rayo no está clasificado, el resto todos los casos son rayos CG y no hay ninguno clasificado como IC.

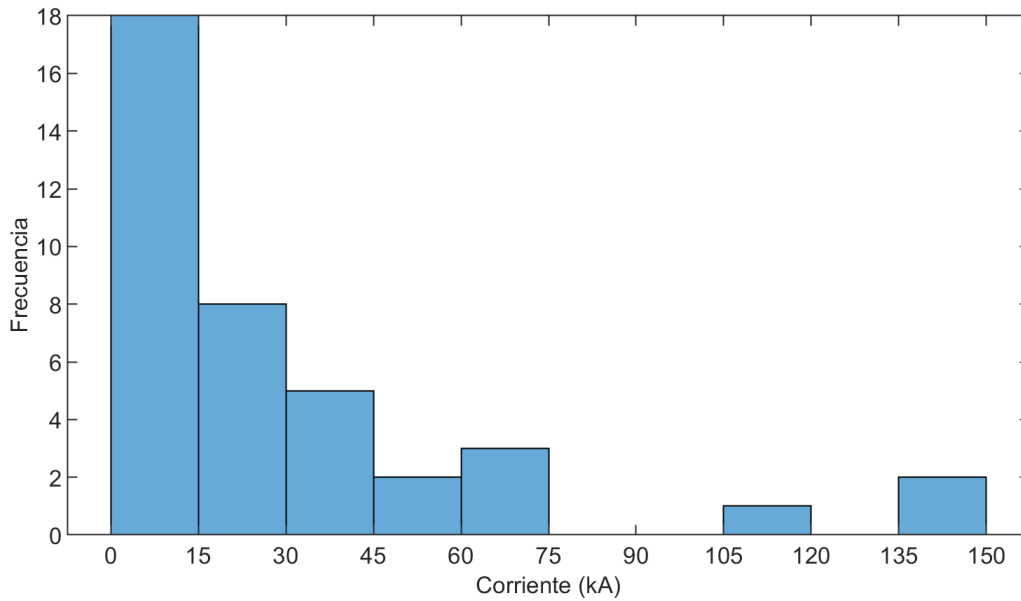


Figura 46. Valores de amplitud de corriente de los rayos cercanos a las turbinas (kA).

A continuación, se presenta la distancia del rayo a la turbina en función de la corriente (Figura 47). La mayoría de casos están a menos de 1 km de la turbina, como se observa con más detalle en la Figura 47.b. Los impactos de rayos con intensidades de corriente mayor, se localizan cerca a la turbina, a menos de 3 km, seguramente se trate de impactos directos. Los casos en los que el rayo está más alejado, probablemente se trate de impactos indirectos o, de líderes ascendentes, no detectados por el LLS al no tener RS.

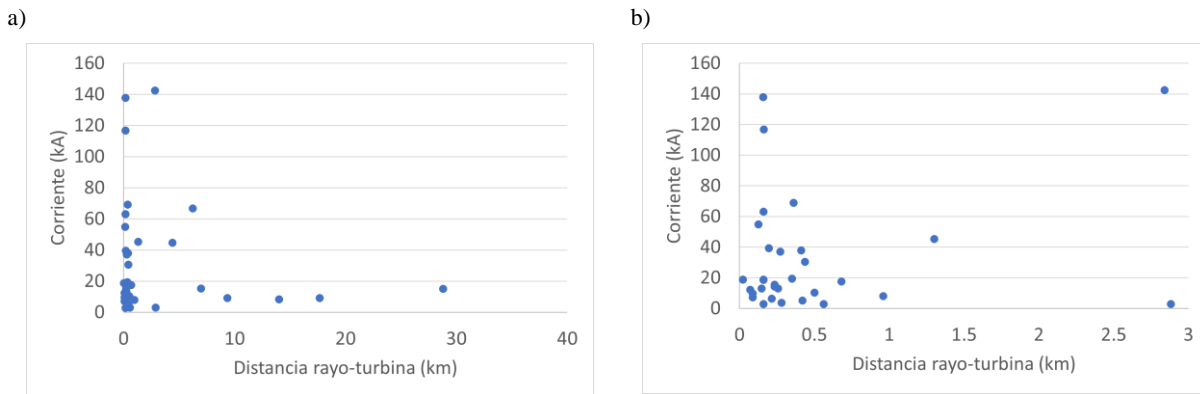


Figura 47. Distancia del rayo a la turbina según la amplitud de corriente (valor absoluto). a) Eje horizontal de 0 a 40 km. b) Gráfico a) ampliando zona más próxima al aerogenerador (0 a 3km).

En la Figura 48, se puede observar la altura efectiva de la turbina según la amplitud de corriente asociada al rayo. Destacan los 3 casos de corrientes más extremas, mayores que 100 kA, los cuales se reportaron en turbinas a partir de 1000 m de altura efectiva.

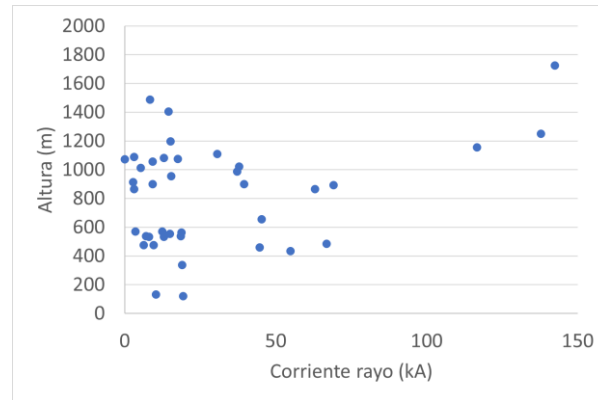


Figura 48. Altura efectiva de la turbina según la amplitud de corriente (valor absoluto).

Otra consideración ha sido la estacionalidad de los rayos para conocer si las incidencias han sido por rayos desarrollados en tormentas de fuerte convección, tal como sucede en el hemisferio norte durante la temporada cálida de abril a septiembre (March et al., 2017). Como resultado, se encontró que el 51% de los casos corresponderían a tormentas de fuerte convección, por lo que el 49% restante sería considerado de posibles rayos de invierno.

Sin embargo, con el criterio de Montanyà et al. (2016) (seleccionando descargas de invierno durante temperaturas inferiores que -10 en la isóbara de 700 hPa), los rayos de invierno se reducen al 13% de los casos. Revisando uno a uno los casos del periodo de octubre a marzo, que no se consideran de invierno con este criterio, hay tres casos. Estos casos corresponden a los meses de enero y febrero y coinciden en la distribución aislada de rayos en el mapa (ver uno de los casos en la Figura 49) y en presentar las temperaturas cercanas a -10 °C en la isóbara de 700 hPa (concretamente $-7,95$ °C, $-9,75$ °C y $-9,75$ °C), por lo que se reagruparon en los casos de invierno. De esta forma, los casos de rayos de invierno pasan a ser un 21%, mientras que el 79% restante son asociados a tormentas de fuerte convección. Como son tipos de tormentas distintas, se analizaron los resultados considerando esta división.

En los casos asociados a rayos durante tormentas de fuerte convección y cuya isoterma de -40 °C (región que asocia la presencia de partículas cargadas positivamente), la mayoría presentaron presiones inferiores a 300 hPa. En los casos de invierno, estas presiones son superiores a dicho valor.

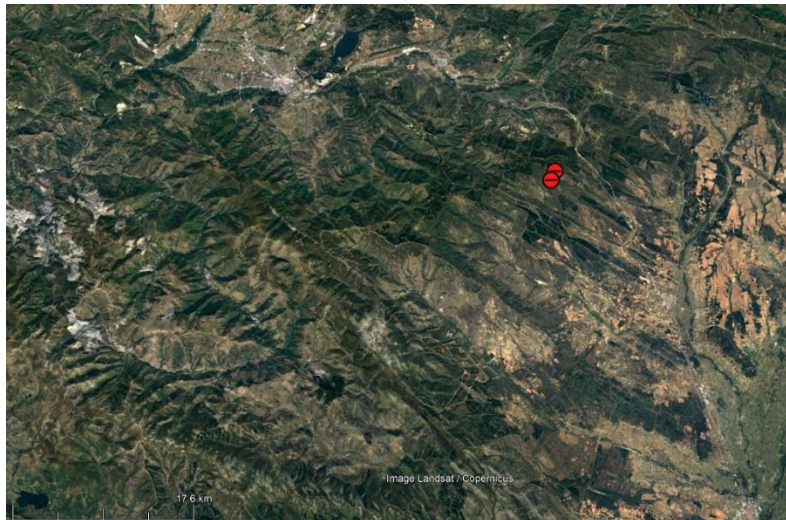


Figura 49. Caso de rayos (símbolo redondo rojo) aislados cerca aerogeneradores en periodo de noviembre a marzo.

Con la distribución mensual de estos casos (Figura 50), los rayos de invierno se encuentran en enero, febrero y marzo. El resto de meses, de abril a diciembre y un caso en febrero, son tormentas con características de fuerte convección. Destacan los 7 casos en octubre, en los que ninguno cumple los criterios indicados para ser considerados rayos de invierno. En general, la distribución mensual es muy distinta a la distribución de rayos del territorio. Según Rivas Soriano et al. (2005), con la climatología de rayos en España de 10 años, el 84% de rayos se producían entre mayo y septiembre, y en los casos de estudio el porcentaje que ocurrió entre estos meses es muy inferior: 18%. Pineda et al. (2018) destaca que los eventos en aerogeneradores de su estudio ocurrían en la interestacionalidad, (en noviembre y abril), difiriendo de los casos estudiados, que ocurren durante todo el año.

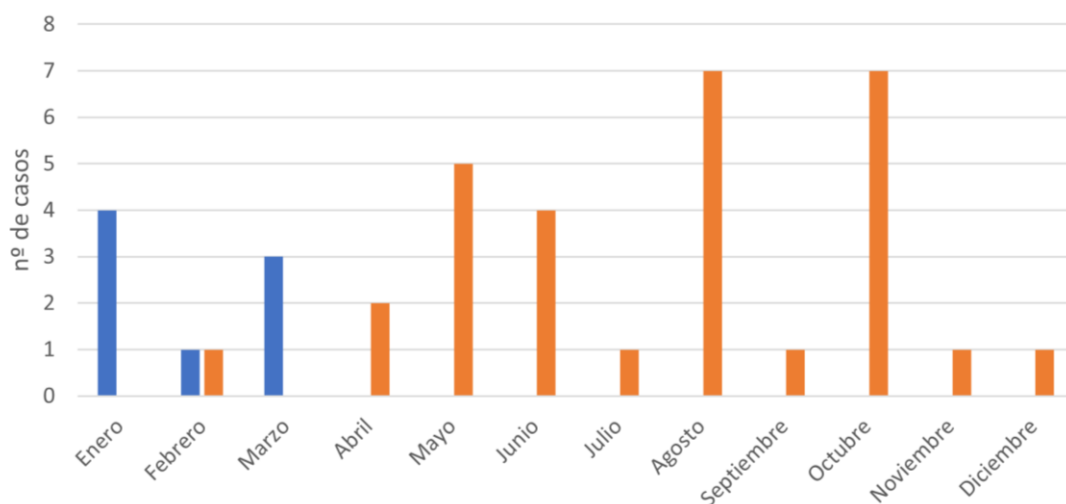


Figura 50. Distribución mensual de los casos de rayos en aerogeneradores, separados por rayos de invierno (azul) y rayos asociados a tormentas de fuerte convección (naranja), propia de la época cálida en el hemisferio Norte.

En cuanto a la localización, todos los casos de rayos de invierno se encuentran únicamente en el norte de la Península Ibérica (Figura 51.a), mientras que los rayos asociados a tormentas de fuerte convección, están distribuidos por todo el territorio (Figura 51.b). Esta distribución de los rayos de invierno se corresponde con

los mapas de la distribución global de rayos de invierno que elaboraron Montanyà et al. (2016), en la Figura 52.

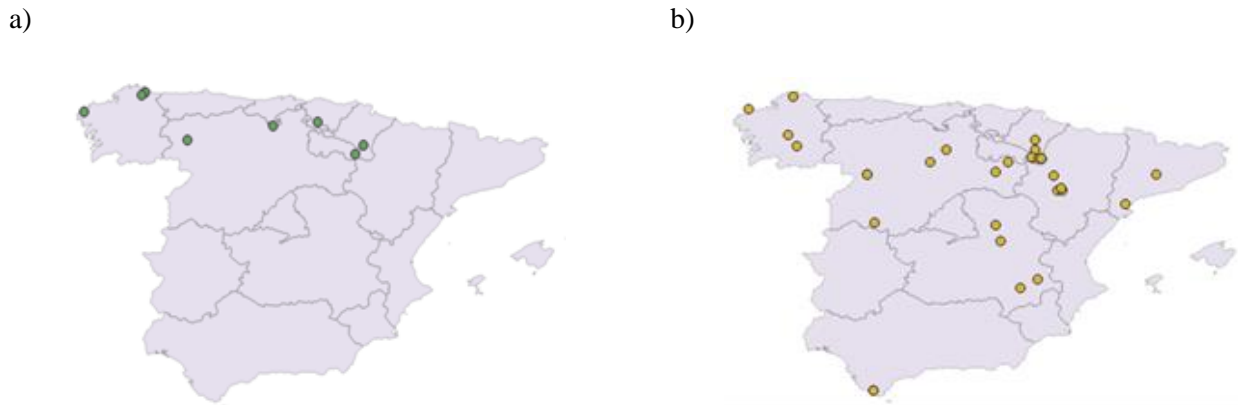


Figura 51. Situación en el mapa de España de: a) los casos con rayos de invierno y b) los casos con rayos asociados a tormentas de fuerte convección. Estos datos corresponden únicamente a la información de rayos, por confidencialidad no corresponden a los casos de las incidencias.

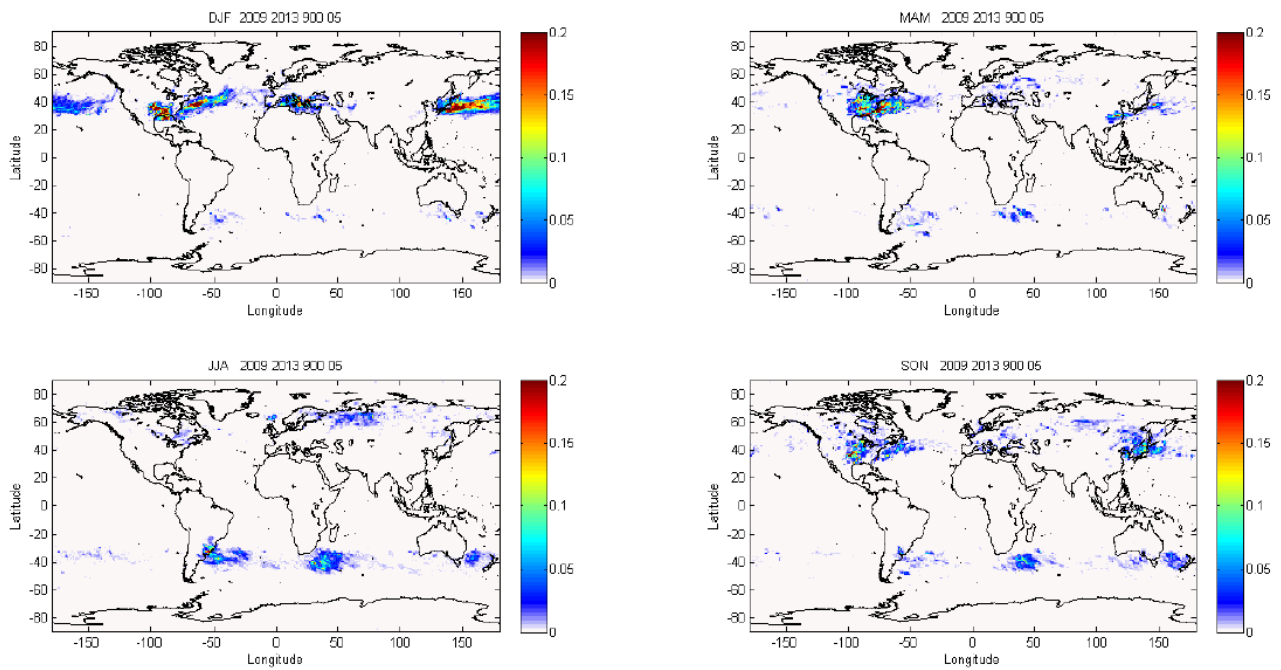


Figura 52. Variación estacional de rayos de invierno (2009-2013). Valores medios de descargas de rayos (strokes) para los 5 años dividido por el área de la celda. (Adaptado de Montanyà et al., 2016).

Al separar por tipos de tormentas, la distancia del rayo más cercano al aerogenerador, se destaca que en casos de rayos de invierno no hay casos a más de 15 km.

6. Caracterización de rayos que afectan aerogeneradores

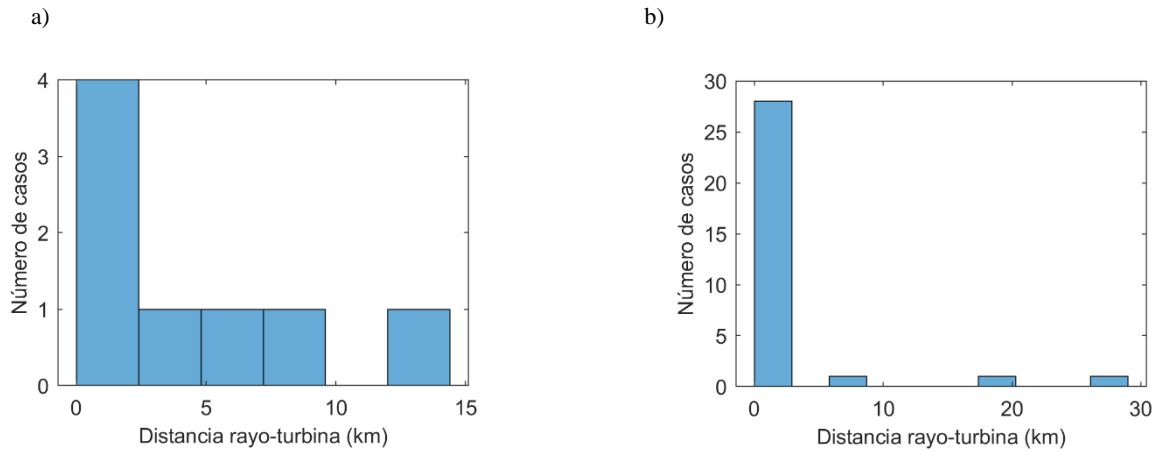


Figura 53. Distancia del rayo más cercano al aerogenerador afectado: a) en casos de rayos de invierno; b) en casos de rayos asociados a tormentas de fuerte convección.

La corriente de los rayos (Figura 54), difiere en los casos de invierno ya que no hay casos de amplitudes elevadas de corriente y mayoritariamente (88%) corresponde a polaridades negativas frente un 12% de casos con polaridad positiva. En casos de rayos asociados a tormentas de fuerte convección, la polaridad de la corriente se distribuye prácticamente igual en positiva y negativa (Figura 54), cuando la mayoría de rayos durante este tipo de tormentas son negativos. En la Península Ibérica, en el estudio de Rivas Soriano (2005) el porcentaje de *flashes* positivos representa entre un 5-10 %. En Pineda et al. (2008) la mayoría de rayos en aerogeneradores tenía polaridad negativa. Los estudios en torres instrumentalizadas distinguen los rayos entre ascendentes y descendentes para posteriormente clasificarlos en positivos y negativos (p.e. Zhou et al., 2012b, Romero et al., 2013, Miki et al., 2010). En nuestro caso, el LLS no determina si el rayo es descendente o no para poderlo comparar con este tipo de estudios.

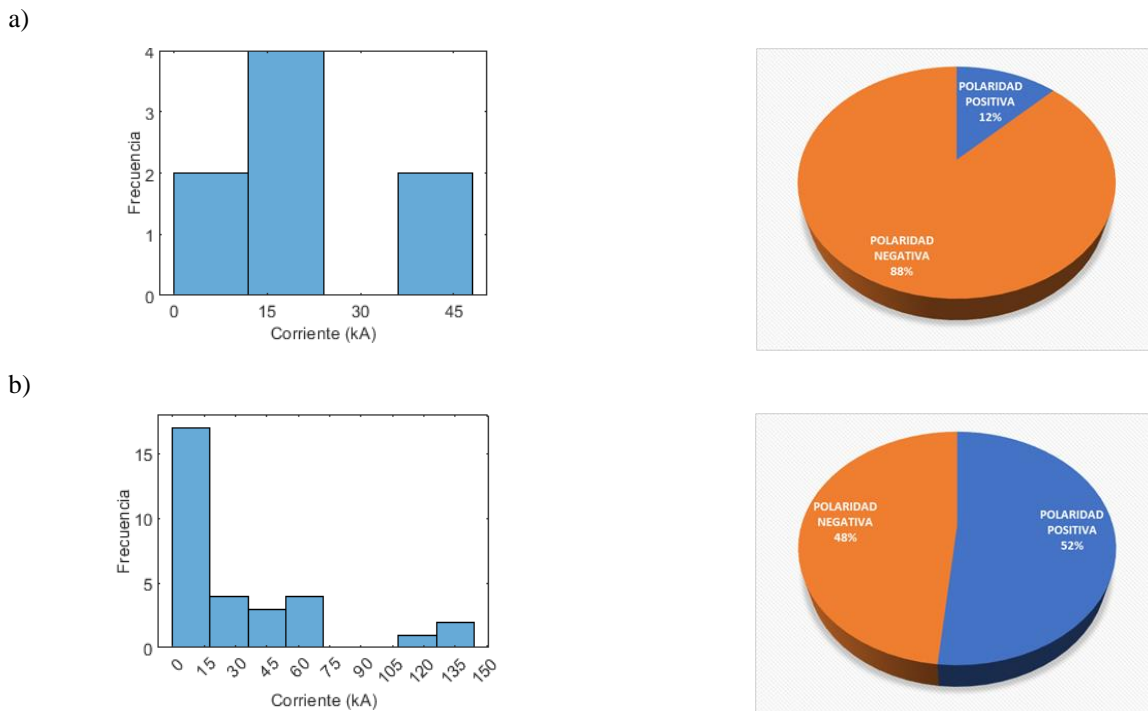


Figura 54. Amplitud de corriente de los rayos (izda.) y polaridad (dcha.): a) en casos de rayos de invierno; b) en casos de rayos asociados a tormentas de fuerte convección.

6.4 Conclusiones

A modo de resumen, a continuación, se destacan los aspectos más relevantes del estudio de impactos de rayos en aerogeneradores.

Se analizaron 39 casos entre 2007 y 2022 en España, en territorio peninsular en que se conoce que hubo daños en aerogeneradores.

La mayoría de los rayos se detectaron a menos de 1 km del aerogenerador y en los tres días anteriores a la fecha en la que se detectó el daño. En los casos que el rayo no se ha detectado cerca se plantean varias hipótesis: que el rayo causara efectos indirectos, que se tratase de un rayo ascendente de baja intensidad, que no hubiese rayo, pero sí líderes ascendentes iniciados por el propio aerogenerador, y que hubiese tormenta eléctrica en unos kilómetros pero que el daño no estuviese relacionado con ello.

La media de corriente de los rayos cercanos al aerogenerador es baja. Son pocos los rayos de alta intensidad en estos casos. Según los estudios como los de Zhou et al. (2012b) y Yokoyama et al. (2014), entre muchos otros, los rayos ascendentes iniciados por los aerogeneradores tienen corrientes bajas pero muy energéticas, comparados con la mayoría de los rayos a tierra negativos³⁺⁰.

Se ha observado que, separando por estacionalidad, el resultado es demasiado genérico y quedan clasificados como rayos de invierno, tormentas que no tienen sus características. Filtrando los casos de invierno según si cumplían la condición de temperatura inferior a -10 °C en la isóbara de 700 hPa (Montanyà et al., 2016), los casos de invierno se reducían. Al observar los casos de meses de rayos de invierno junto a las características de la distribución espacial de los rayos, se vio que, en casos de rayos de invierno, son pocos rayos aislados detectados muy próximos de los aerogeneradores, se encontró que en el mes de octubre (7 casos) ninguno cumplía estas condiciones de invierno, y que el filtro en estos casos sería temperaturas inferiores a -7.95 °C en la isóbara de 700 hPa.

Únicamente el 18% de los casos ocurrieron entre mayo y septiembre, que son los meses donde en España ocurren el 84% de los rayos, según Rivas Soriano et al. (2005). Aunque los casos, al presentarse todo el año, difieren de los casos en aerogeneradores presentados en Pineda et al. (2008) que mostraban una interestacionalidad al ser la mayoría en los meses de noviembre y abril.

Los casos de rayos de invierno se localizan únicamente en el norte del territorio, mientras que los asociados a tormentas de fuerte convección se reparten por todo el territorio. Las corrientes de estos rayos de invierno son más bajas y de polaridad mayormente negativa.

En los rayos asociados a tormentas de fuerte convección, la polaridad es mayormente positiva, que contrasta con la proporción habitual de este tipo de tormentas, que es más reducida. Una hipótesis podría ser un error de

clasificación, donde el LLS detectase la parte IC del rayo, como CG, que se reforzaría con el hecho de que en todos los casos el rayo más cercano al aerogenerador es de tipo CG, excepto un caso que no tuvo clasificación.

Este estudio verifica que los daños en aerogeneradores pueden suceder durante todo el año en España, pero especialmente fuera de la temporada de mayor actividad de rayos. Cabe destacar los rayos de invierno que pueden ser iniciados por la propia estructura, que, aunque la amplitud de corriente sea menor, pueden ser muy energéticos. Se confirma que un sistema LLS de alta precisión es muy útil para verificar si el daño fue causado por rayos.

7 Corrientes extremas del rayo según situación geográfica

Si en el capítulo 5 se trató la recurrencia de rayos en una ubicación geográfica, los llamados RLS, en este capítulo se analizan qué ubicaciones geográficas presentan los rayos con las corrientes más extremas. Para encontrar estas corrientes se ha partido de la distribución de corrientes de los rayos detectados con LINET, el LLS instalado en la Península (capítulo 3), y se ha evaluado la eficiencia de este LLS, con el método propuesto en el capítulo 4. Se han tenido en cuenta las diferencias de tipos de tormentas según la estacionalidad, a partir de los resultados del capítulo 6 (con los casos de rayos en aerogeneradores).

7.1 Introducción

Cuando se trata de líneas eléctricas de transmisión y distribución, para hacer los cálculos de los modelos de sobretensiones, la entrada principal es la corriente de pico del rayo. Es interesante que también la incluyan los estándares de protección contra el rayo, los cuales principalmente se basan en la densidad de rayos de la zona para evaluar el riesgo de rayos y la protección requerida. También, para la seguridad y la protección de las actividades al aire libre es útil conocer el comportamiento de la corriente de los rayos en la zona.

Según Rakov y Uman (2003), la corriente de pico del rayo no está bien correlacionada con la carga total transferida durante una RS, porque en muchos rayos, entre *strokes* continúa fluyendo corriente de la nube hasta el suelo, transfiriendo la mayor parte de carga durante todo el *flash* entero. También, como se indica en el capítulo 2, con las corrientes en estructuras elevadas, aunque la corriente sea menor, puede haber gran transferencia de carga porque son rayos de mayor duración temporal. Sin embargo, en general, tal como indica Said et al. (2013), las medidas de corriente pico son de fundamental interés, ya que cuantifican la fuerza de la fase impulsiva del RS.

La distribución de corriente de los rayos no es regular y puede cambiar significativamente según la zona. Se sabe que la incidencia climatológica de los rayos de nube a tierra (CG) tiene grandes diferencias regionales asociadas a variaciones de escala sinóptica en el clima que afectan el desarrollo y la propagación de la convección profunda (Cummins, 2012).

En este estudio se presenta un análisis de distribución de corriente en Cataluña. Se han identificado las intensidades más extremas y se han observado las diferencias por polaridad del rayo, por estacionalidad y por meses. En Montanyà et. al (2011) hacen una primera aproximación para una zona que incluye Cataluña, donde presentan la actividad de rayos de intensidades extremas, según el periodo del año: de abril a septiembre (temporada cálida) y de octubre a marzo (temporada fría), para rayos positivos y negativos, utilizando celdas

de 5x5 km, tal como muestra la Figura 55. En este estudio se observó que durante la temporada cálida la mayoría de rayos extremos negativos ocurrían sobre el mar y áreas costeras mientras que las corrientes extremas positivas lo hacían en zonas montañosas (zona de los Pirineos y Prepirineos).

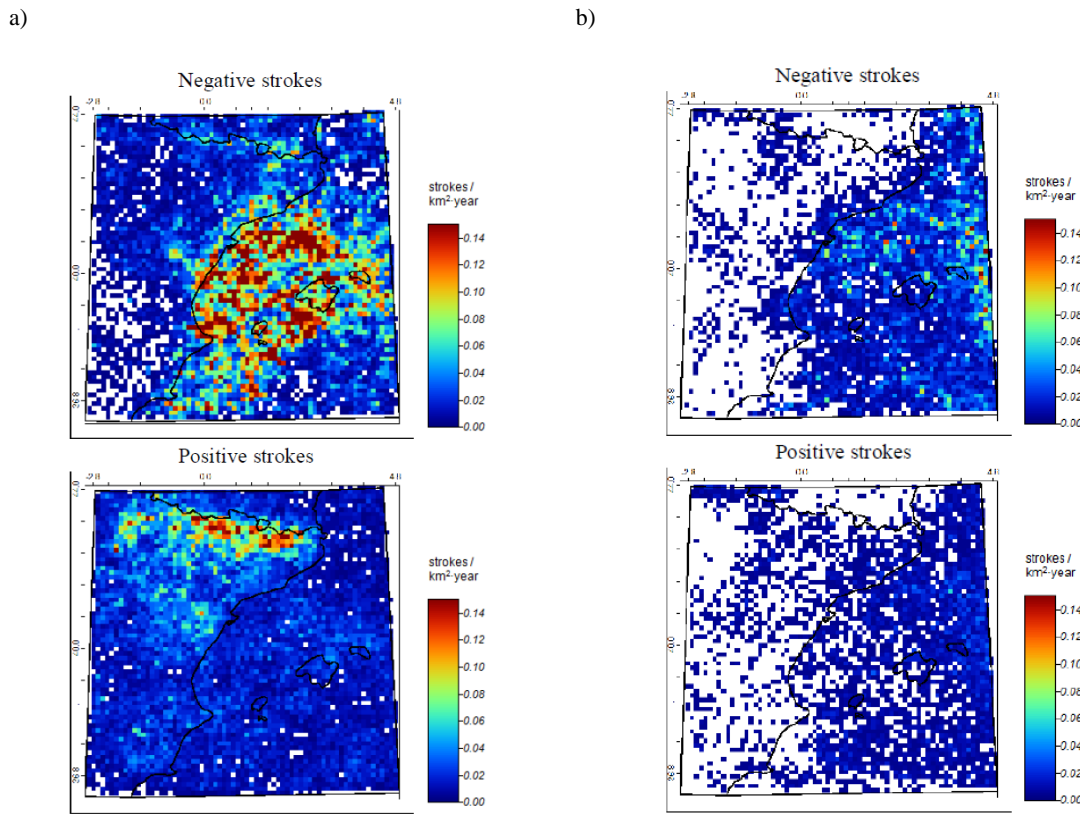


Figura 55. Densidad de rayos negativos y positivos de corriente extrema (5%). a) Periodo de abril a septiembre (temporada cálida). b) Periodo de octubre a marzo (temporada fría). (Adaptado de Montanyà et. al, 2011).

En este estudio, el periodo de observación se ha ampliado a 10 años y se ha analizado con más detalle la estacionalidad y la distribución geográfica de estos rayos extremos.

7.2 Datos y metodología

Los datos de rayos provienen del LLS LINET, descrito en el capítulo 3 de esta tesis. Se han seleccionado únicamente los rayos tipo CG en un periodo de 10 años, de 2011 a 2020 y se han agrupado en *flashes*, siguiendo el criterio de agrupación descrito en el capítulo 2. El área seleccionada comprende la región de Cataluña y parte del mar Mediterráneo. Como se explica en el capítulo 5, es una zona con distintas características geográficas donde hay zonas de valles y planicies, zonas montañosas y zonas costeras, tal como se puede observar en el mapa de elevación de la Figura 56.

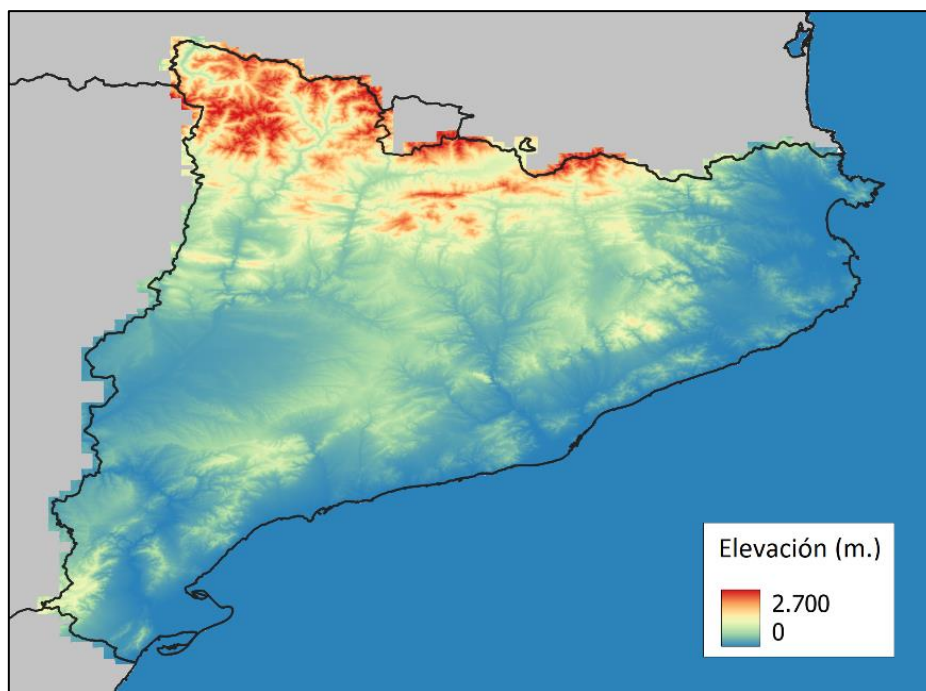


Figura 56. Mapa de elevación de la región de Cataluña.

El primer paso de la metodología fue encontrar las corrientes de todos los *flashes* positivos de toda el área y, a partir de la distribución de corrientes, calcular donde se encuentra el percentil 90. El mismo proceso se siguió para los *flashes* negativos. El criterio de considerar un rayo extremo era que fuera más grande o igual a la corriente del percentil 90 en valor absoluto.

Se dividió el área en una cuadrícula de 10 km x 10 km y se buscó la GFD de rayos extremos para cada celda de la cuadrícula. Este proceso se siguió para distintos periodos de tiempo: todo el periodo, por estacionalidad y por meses.

Para ver si en cada celda hay más rayos extremos positivos o negativos en proporción, independientemente de qué polaridad tiene el mayor número de rayos extremos, se normalizó la GFD de cada celda siguiendo la ecuación (21) para la GFD de *flashes* extremos negativos y para los positivos y se calculó la división entre estos dos valores para tener la proporción (ecuación 22).

$$GFD_{norm} = \frac{GFD - media(GFD)}{desv.est.(GFD)} \quad (21)$$

Donde GFD_{norm} es la densidad de *flashes* normalizada de cada celda, GFD es la densidad de *flashes* de cada celda, a la que se resta la media de todas las GFD y se divide por la desviación estándar de estas GFD. Se calcula para *flashes* positivos ($GFD_{norm\ fl\ pos}$) y para negativos ($GFD_{norm\ fl\ neg}$).

$$\frac{GFD_{norm\ fl\ pos}}{GFD_{norm\ fl\ neg}} \quad (22)$$

Por otro lado, la distribución de corrientes negativas, se comparó con la de referencia, según la metodología descrita en el capítulo 4 de esta tesis.

7.3 Resultados y discusión

Se encontró que el percentil 90 de los *flashes*, que correspondía a un valor de -18.11 kA para la distribución de corrientes de los *flashes* negativos y de 22.14 kA para los positivos. A partir de estos umbrales de corriente se encontró la GFD ($\text{fl} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}$) para todo el periodo (2011-2020), tal como muestran la Figura 57 y la Figura 58, donde se observa que los rayos negativos extremos mayoritariamente se encuentran en el mar, mientras que sus correspondientes positivos se sitúan en las zonas montañosas, tal como también se observó en el estudio de Montanyà et. al (2011).

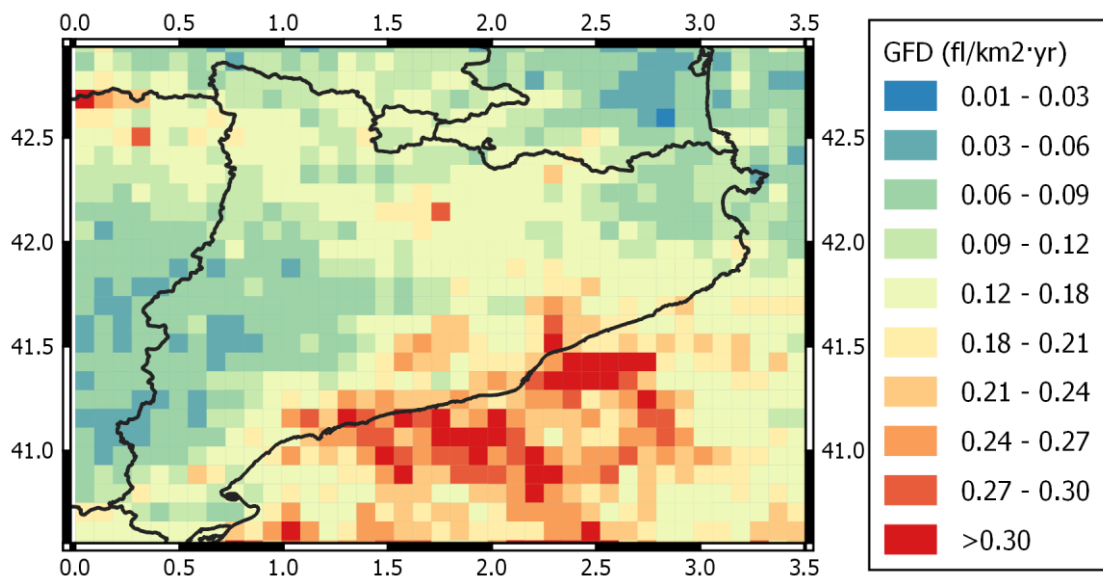


Figura 57. Densidad Rayos a Tierra - GFD para intensidades de corrientes negativas mayores al percentil 90 ($kA \leq -18.11 kA$) – Área de 10 km x10 km - Periodo 2011-2020.

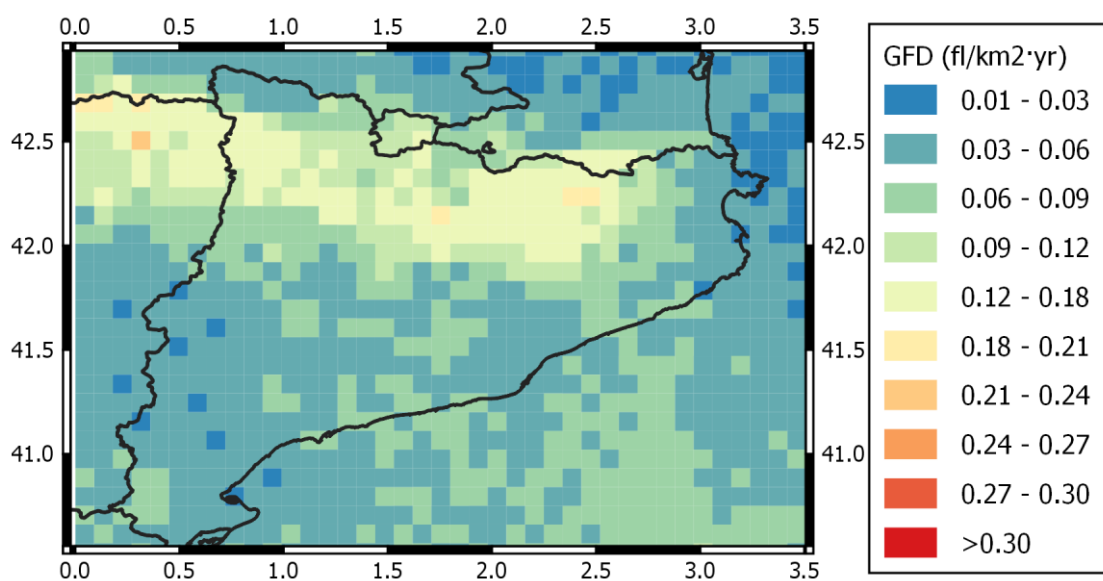


Figura 58. Densidad Rayos a Tierra - GFD para intensidades de corrientes positivas mayores al percentil 90 ($kA \geq 22.14$). Área de 10 km x10 km - Periodo 2011-2020.

En total, el número de *flashes* negativos representa un 70%, por lo que ya se esperaban una mayoría de rayos negativos. Sin embargo, la GFD de los rayos negativos extremos en las celdas con más GFD, tan sólo es un 30% mayor que la GFD de los rayos positivos de las celdas con mayor GFD, lo que implica que existen celdas con gran concentración de rayos positivos. Para conocer en cada celda si hay mayor proporción de rayos extremos negativos o positivos, sin tener en cuenta que en total el número de rayos extremos negativos es mayor, se normalizó la GFD para rayos extremos positivos y para los negativos, con ecuación (9). La Figura 59 muestra la división de la GFD normalizada de rayos extremos positivos, entre la GFD normalizada de los rayos extremos negativos, calculadas a partir de la ecuación (10). Se observa en esta figura que las celdas blancas muestran que la relación entre las dos GFD es cercana a 1, por lo que hay tantos rayos extremos negativos como positivos; las celdas naranjas tienen más rayos extremos negativos; y las celdas lilas más rayos positivos. Entonces, en las zonas de alta montaña, como los Pirineos y Prepirineos, es la única zona donde hay mayoritariamente más proporción de rayos extremos positivos (en color lila) que negativos. Mientras que prácticamente todo el resto del mapa la proporción de *flashes* negativos (en color naranja) extremos gana a los positivos, excepto en algunas celdas (en blanco) que se iguala la proporción de positivos y negativos.

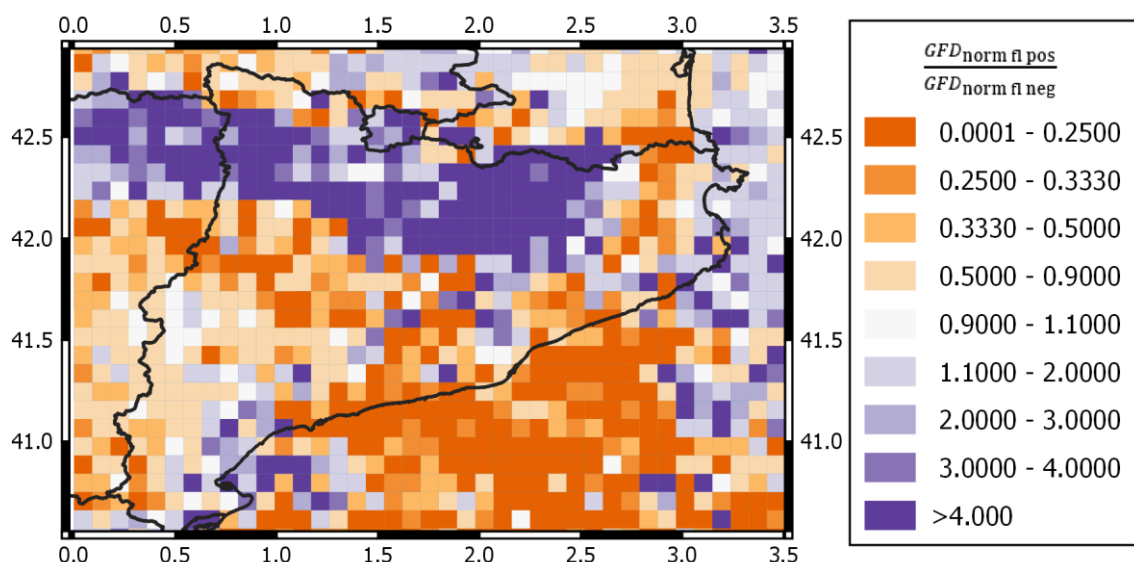


Figura 59. Mapa de la relación entre rayos extremos positivos entre rayos extremos negativos, a partir de la división entre la GFD normalizada para flashes positivos entre la GFD normalizada para flashes negativos (ecuaciones 9 y 10). Las celdas de color naranja tienen más rayos extremos negativos y las lilas más de positivos, mientras que las blancas se equipara la proporción de los rayos extremos negativos con los positivos. Área de 10 km x10 km - Periodo 2011-2020.

Al separar por estacionalidad, en la Figura 60, distinguimos dos periodos: de abril a octubre y de noviembre a marzo (esta división de meses se analiza y justifica en el capítulo anterior de esta tesis). Se puede observar claramente que la mayor densidad de rayos extremos ocurre en temporada de abril a octubre, que se corresponde con la época de más actividad de rayos. Según Rivas Soriano et al. (2005), las tormentas de convección profunda ocurren mayoritariamente en las estaciones cálidas y los rayos son predominantemente de polaridad negativa, de acuerdo a la climatología de los rayos. Se distingue la diferencia en la distribución geográfica observada también con todo el periodo (Figura 57 y la Figura 58), más claramente en los mapas de

los meses de abril a octubre, mientras que, en los mapas de diciembre a marzo, hay poca diferencia entre rayos extremos positivos y negativos.

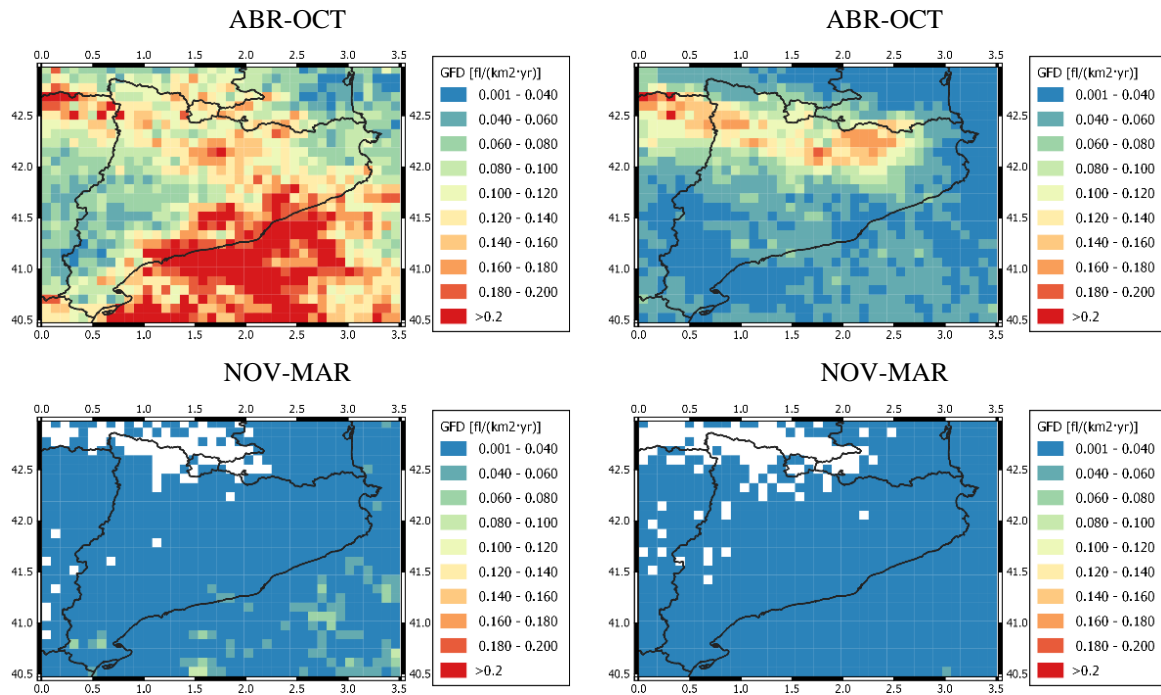
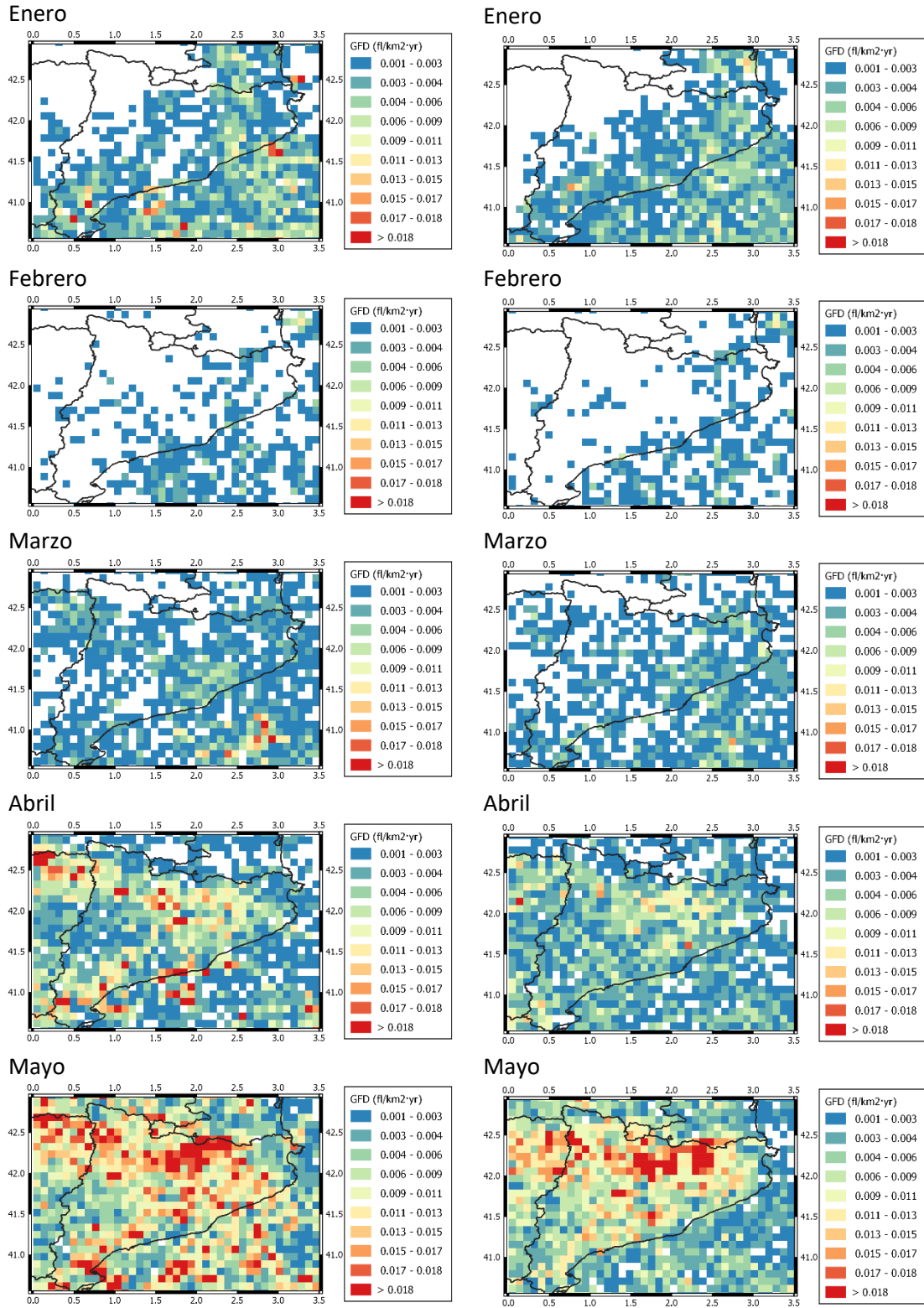


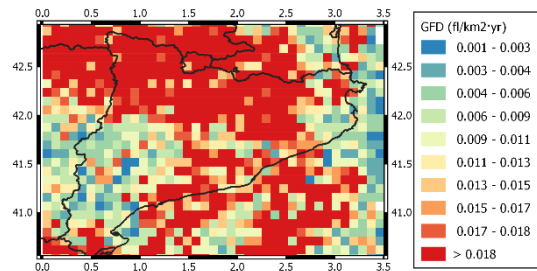
Figura 60. Densidad Rayos a Tierra (GFD) Área de 10 km x10 km - Periodo 2011-2020: izda. para intensidades de corrientes negativas mayores al percentil 90 ($kA \leq -18.11$ kA); dcha. para intensidades de corrientes positivas mayores al percentil 90 ($kA \geq 22.14$).

En el grupo de mapas de la Figura 61 se detalla la GFD mensual para rayos extremos negativos y separadamente para los positivos. Los mapas mensuales de los meses de diciembre a marzo son muy parecidos en ambos casos. A partir de abril el comportamiento es similar, aunque los rayos extremos negativos empiezan a destacar por tener densidades mayores. En ambos casos, en mayo hay mayor GFD de rayos extremos en zona montañosa de Pirineos y Prepirineos. Es en verano (junio, julio y agosto) donde se produce la mayor diferencia: la mayor GFD de rayos extremos negativos se va expandiendo por todo el territorio, llegando a septiembre donde la mayor GFD queda en el mar. También se observa esta alta GFD en el mar en octubre y noviembre, pero va disminuyendo su valor. Durante todos en estos meses, los rayos extremos positivos se mantienen en la zona montañosa de Pirineos y Prepirineos, en mayor concentración en verano y en menor el resto de meses.

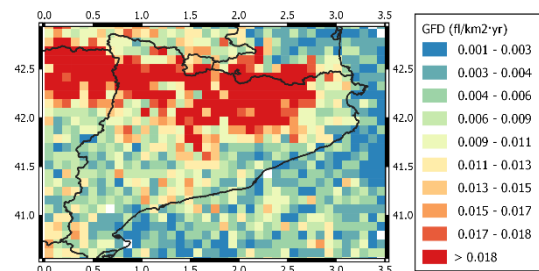


7. Corrientes extremas del rayo según situación geográfica

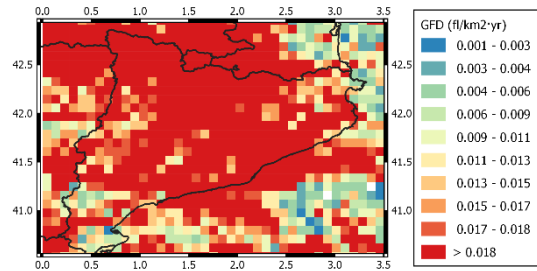
Junio



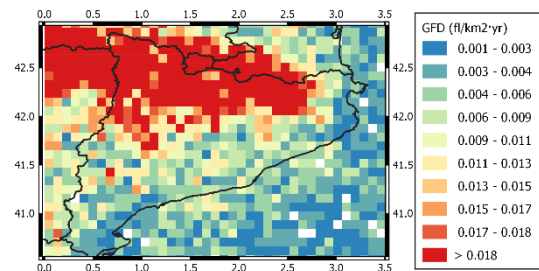
Junio



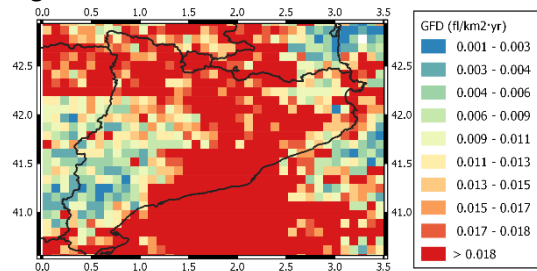
Julio



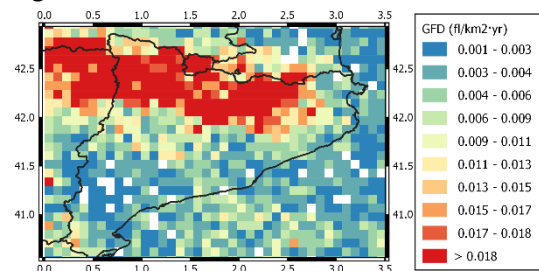
Julio



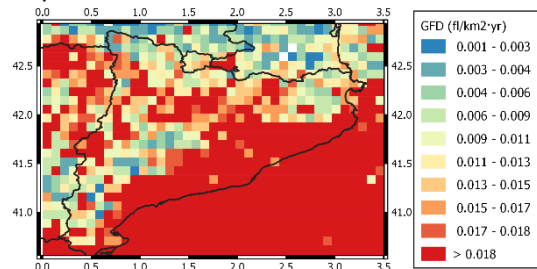
Agosto



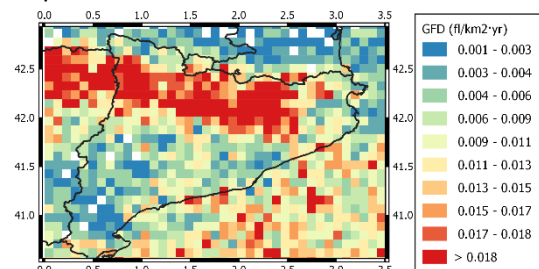
Agosto



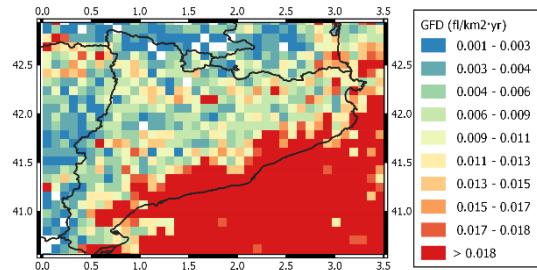
Septiembre



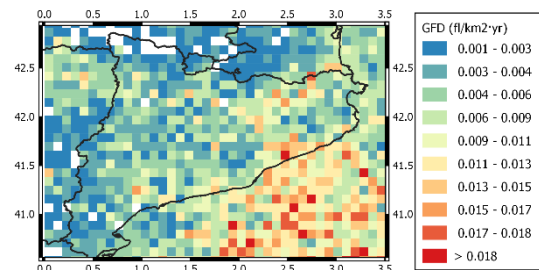
Septiembre



Octubre



Octubre



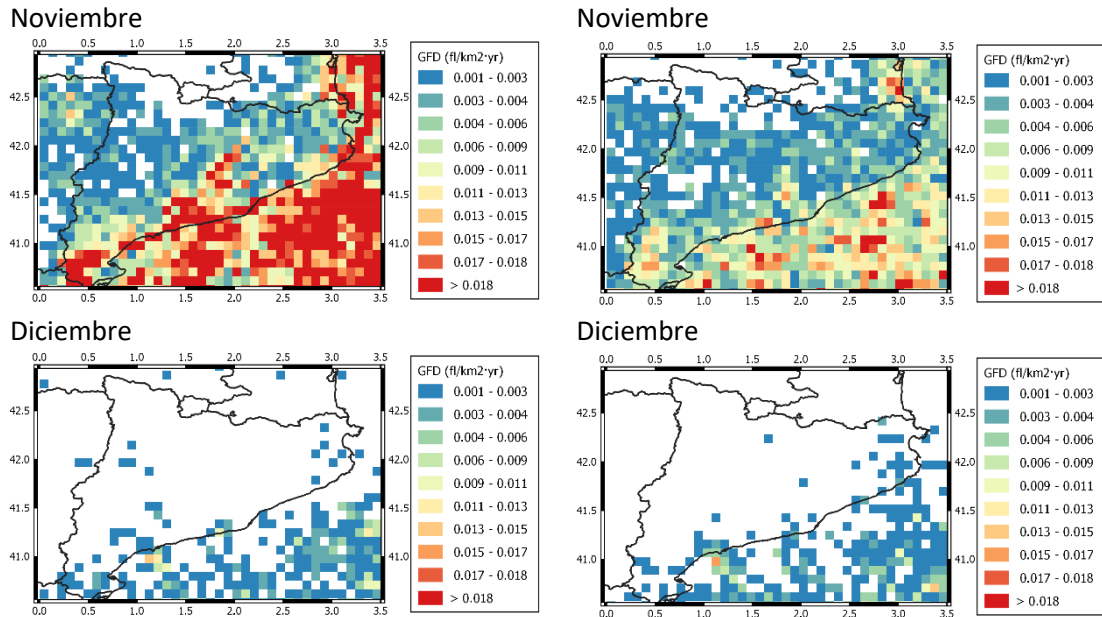


Figura 61. Densidad mes a mes de Rayos a Tierra (GFD) Área de 10 km x10 km - Periodo 2011-2020: izda. para intensidades de corrientes negativas mayores al percentil 90 ($kA \leq -18.11$ kA); dcha. para intensidades de corrientes positivas mayores al percentil 90 ($kA \geq 22.14$).

Para conocer si estos rayos extremos ocurren únicamente de forma puntual por episodios concretos de tormenta, se representaron los días con rayos extremos anuales en la Figura 62. En el caso de los rayos extremos positivos, la distribución geográfica de los días es muy parecida a la GFD (Figura 58), donde el máximo número de días y de GFD se sitúa en las áreas más montañosas (Pirineos y Prepirineos). En cambio, con los rayos extremos negativos, las zonas de más días de rayos coinciden en que están situadas en las áreas más montañosas. Sin embargo, también la zona costera y la del mar tienen bastantes días de rayos extremos, diferenciándose del mapa de GFD donde la mayor densidad de rayos estaba en el mar (Figura 57). Seguramente este incremento es debido al efecto de la gran actividad de rayos en las tormentas en el mar durante los meses cálidos, como se muestra en la Figura 61.

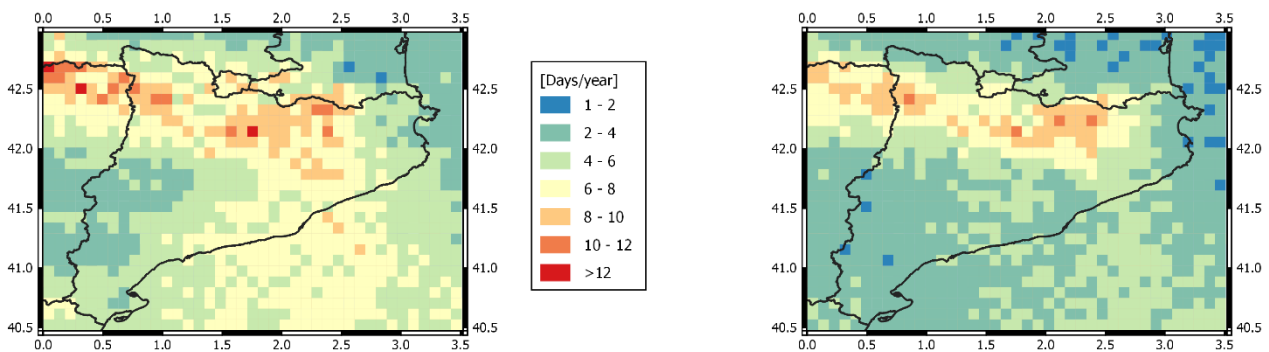


Figura 62. Número de días anuales con rayos extremos (Área de 10 km x10 km - Periodo 2011-2020): izda. para intensidades de corrientes negativas mayores al percentil 90 ($kA \leq -18.11$ kA); dcha. para intensidades de corrientes positivas mayores al percentil 90 ($kA \geq 22.14$).

El hecho de que haya más rayos extremos negativos que positivos en general, en cualquiera de los mapas presentados, coincide con el estudio de Kochtubajda y Burrows (2010). En este estudio encontraron que, en

Canadá durante el periodo 1999-2008, la mayoría de *flashes* de intensidades altas (>100kA) ocurrían más frecuentemente con polaridades negativas: ratio de 1.2 en *flashes* de 100-200 kA y de 0.6 en *flashes* de más de 200 kA. Otros estudios en otras zonas presentan ratios diferentes, como el de Lyons et al. (1998) y Pinto et al. (2009), pero en todos hay mayor proporción de rayos extremos negativos. Este último (Pinto et al., 2009), encontró que los rayos mayores a 75 kA, en el caso de los positivos se ubicaban mayoritariamente en el sur y centro de las montañas, mientras que, en los negativos, la distribución estaba menos influenciada con la altitud, atribuyéndolo al hecho de que en las montañas hay un menor número de CG negativos. Shulz y Diendorfer (1999) también observaron que la corriente máxima media de los rayos negativos disminuía en altitudes elevadas.

Estudios como Kotroni y Lagouvardos, (2008) del Mediterráneo occidental y países alrededor, y Williams y Stanfill (2002), de alcance mundial, tienen en cuenta la actividad de rayos CG y observan mucha más actividad de rayos en la tierra que en el mar. A diferencia de los resultados de este estudio que, en el caso de corrientes del rayo extremas negativas, habría más actividad en el mar que en la tierra, coincidiendo con otros estudios, como Zoghzoghy et al. (2015), que a partir de los datos de rayos de la red GLD360, que utiliza detectores LF-VLF, observaron que los *flashes* CG eran más energéticos en los océanos que en tierra, al igual que el estudio de Light et al. (2013) con los datos del satélite FORTE/PDD y Rudlosky et al. (2019), con los datos del satélite GLM. Asfur et al. (2020) apuntan a que las diferencias de intensidades de los rayos en el mar se deben a la presencia de iones en el agua, debido a la concentración salina, que permite una mayor conductividad de la corriente de los rayos. También en Lyons et al. (1998) encontraron más rayos intensos negativos en el mar.

Las montañas de los Pirineos y Prepirineos tienen una gran concentración de *flashes* extremos más positivos que negativos, por lo que se ha observado en la proporción de la Figura 59, pero separadamente, mes a mes se observa que en este sistema montañoso ocurren rayos extremos de ambas polaridades. Tal como se menciona en el capítulo 5, a partir de investigaciones en torres instrumentadas (Vogt y Hodanish, 2014; Cummins, 2012; Bourscheidt et al., 2009) y modelado (Soto et al., 2014), se encontró que la forma de la montaña tiene una fuerte influencia en los campos eléctricos locales (*sharp effect*), favoreciendo así la iniciación de un rayo ascendente desde una torre en lo alto. Sin embargo, la presencia de una torre podría no ser necesaria (ver la influencia de rayos en terrenos escarpados), como explican Holle et al. (2021), quienes encontraron que, en el Gran Cañón, hay una gran incidencia de rayos en las elevaciones más altas y a lo largo del borde del Cañón.

Si se compara la distribución de rayos extremos positivos (Figura 58) con la distribución de todos los rayos positivos (Figura 63), se observa que la distribución de los *flashes* positivos en general se distribuye por todo el territorio, mientras que las de intensidades más altas (mayores al percentil 90) los máximos se concentran en la zona de los Pirineos y Prepirineos. Las hipótesis que se plantean son: si el canal de los rayos positivos al ser más cortos favorece descargas de rayo de mayor intensidad, o si las tormentas de montaña propician los rayos positivos.

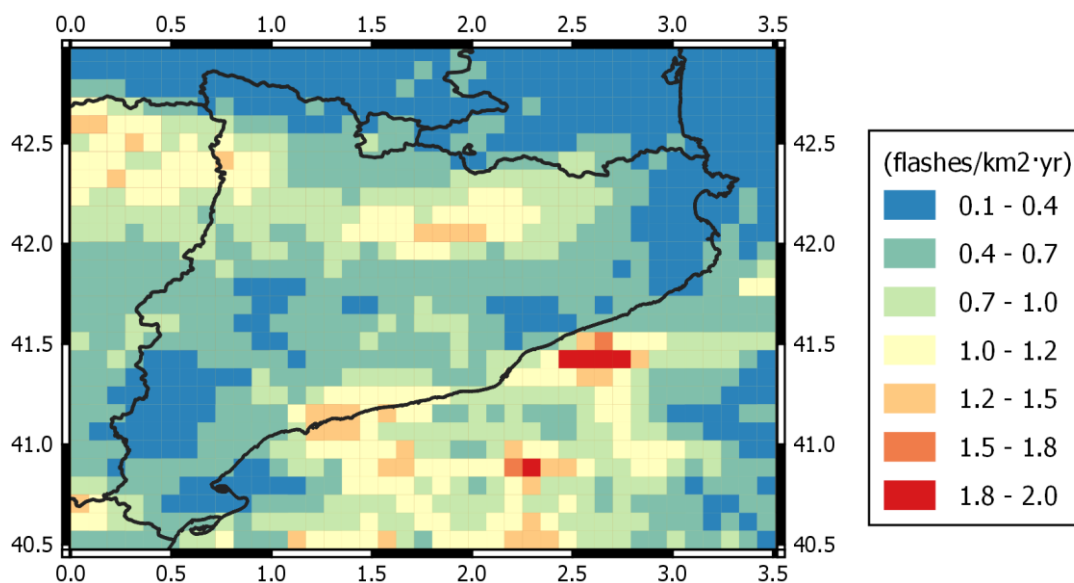


Figura 63. Densidad Rayos a Tierra - GFD intensidades de corrientes positivas. Área de 10 km x10 km - Periodo 2011-2020.

Un concepto relacionado con rayos de intensidades altas son los *superbolts*. En el capítulo 2.4 se introdujeron, como los rayos más potentes que existen. En Holzworth et al. (2019), en los casos que pudieron verificar con un LLS, observaron que la corriente de pico media de los *superbolts* negativos coincidentes es -267 kA y los pocos coincidentes positivos también tenían corrientes cercanas a 200kA o superiores. Según este estudio y el de Ripoll et al. (2021), también el Mar Mediterráneo y su costa eran zonas de *superbolts*. En los datos que se han utilizado en la zona de Cataluña, un 0.08 % del total de *flashes* extremos negativos tiene una corriente inferior a -200 kA y un 0.25% de los extremos positivos su corriente supera los 200 kA, quizás algunos de estos *flashes*, con más análisis que incluyeran datos de satélite para comprobar su energía asociada, podrían ser clasificados como *superbolts*.

Para las corrientes negativas, se ha ajustado la curva de distribución con la de referencia, con el método presentado en el capítulo 4, resultando una eficiencia de detección del 74% (ver Figura 64), que valida que la mayor parte de rayos fueron detectados, sobre todo los de más intensidad, que son los utilizados en este estudio.

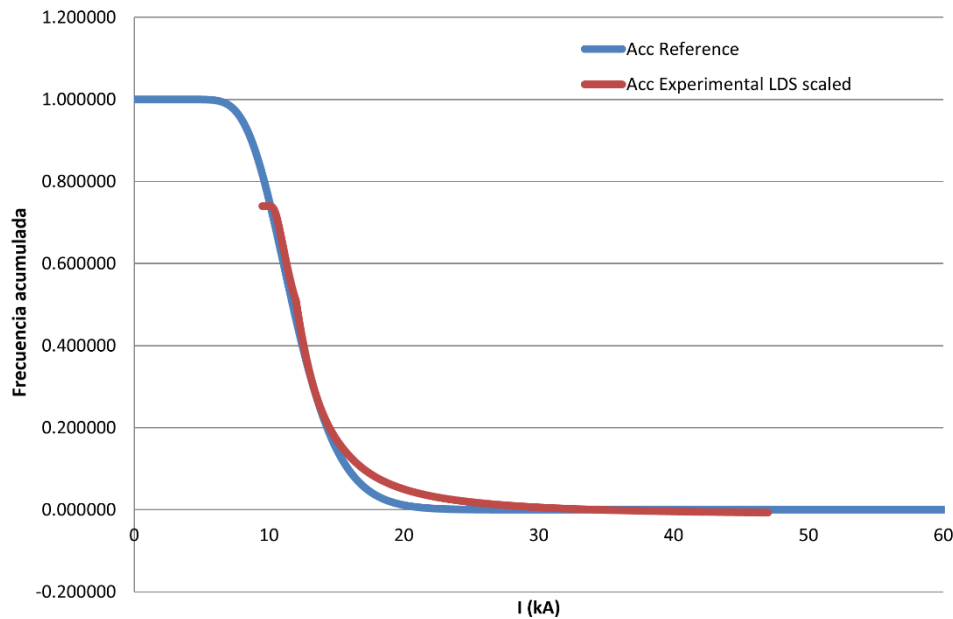


Figura 64. Curva escalada de la distribución corrientes negativas para ajustar con la curva de referencia.

7.4 Conclusiones

Este estudio ha ampliado el trabajo iniciado en Montanyà et. al (2011) y se ha centrado en la distribución de corrientes mayores al percentil 90 para *flashes* positivos y negativos en la zona de Cataluña para distintos periodos. Se ha visto que las zonas con más actividad de rayos de corriente extrema son el mar y las zonas de alta montaña como Pirineos y Prepirineos. El comportamiento es distinto según la polaridad: los rayos extremos negativos se localizan en estas dos zonas de gran actividad mientras que los rayos extremos positivos en los Pirineos y Prepirineos. Este comportamiento sucede sobre todo en los meses entre abril y octubre, que coincide con los meses de más GFD de la región.

En general, se han detectado más rayos extremos negativos que positivos, coincidiendo con otros estudios similares como los de Kochtubajda y Burrows (2010), Lyons et al. (1998) y Pinto et al. (2009). Asfur et al. (2020) apunta a que las diferencias de intensidades de los rayos en el mar se deben a la presencia de iones en el agua, debido a la concentración salina, que permite una mayor conductividad de la corriente de los rayos. También este estudio relaciona la salinidad con los *superbolts*, que se encuentran en zonas de costa y mares de alta concentración salina. Respecto a si los rayos de intensidades extremas de este estudio se pueden relacionar con este tipo de fenómeno, hacen falta datos satelitales que indiquen la energía asociada a cada descarga, pero un 0.18 % en el caso de los *flashes* extremos negativos y un 0.25% en el de los positivos, tienen corrientes de más de 200 kA compatibles con este tipo de fenómeno.

Los rayos extremos positivos se concentran en las zonas más montañosas, a comparación de los rayos positivos sin filtros de corrientes, que se distribuyen por todo el territorio. Como hipótesis se indica que quizás en las

montañas, al quedar más cerca de las nubes, especialmente en invierno, el canal del rayo es más corto y puede favorecerlos. Otra hipótesis es si las tormentas de montaña favorecen los rayos positivos.

En los estándares de protección contra el rayo, que actualmente se basan en la GFD podrían también tener en cuenta si el equipo a proteger está en una zona de alta actividad de corrientes extremas. La corriente pico es importante en el cálculo de sobretensiones en las líneas eléctricas de transmisión y distribución. Se podría desarrollar un factor geográfico en un estudio futuro para que se tuviera en cuenta a la hora de calcular estas sobretensiones.

8 Conclusiones finales

A continuación, se presentan las principales conclusiones globales y las principales aportaciones de esta tesis, que intentan contestar a las preguntas de investigación planteadas inicialmente.

Las estructuras elevadas (más de 100 m), como aerogeneradores o torres de telecomunicaciones, necesitan una especial protección contra el rayo, ya que suelen ser objeto de impacto de rayo. Esto se debe a su exposición a fuertes campos eléctricos bajo de las nubes de tormenta y estar ubicados muchas veces en terrenos elevados. Estas estructuras acostumbran a presentar una densidad de rayos mayor respecto a la densidad de rayos de las zonas de alrededor a la instalación. Sin embargo, este incremento de densidad no se refleja en los mapas de GFD, y en que se calculan los llamados *hot spot*. Un *hot spot* va asociado a un área más o menos grande, según el estudio y se puede ver alterado por episodios puntuales de fuertes tormentas porque se busca la mayor densidad de rayos. La característica que pueden tener estas instalaciones elevadas es la frecuencia de impacto de rayos. A partir de esta reflexión, se cuestionó la siguiente pregunta de investigación:

1. ¿Pueden existir lugares donde impacta un rayo de forma periódica? ¿Cómo definirlos y qué características presentan?

En el capítulo 5 se ha introducido un nuevo concepto: los RLS, que son sitios que año tras año se ven afectados por impactos de rayos, independientemente del número de rayos. Se ha validado el método en dos áreas de estudio una en Cataluña (España) y la otra en el Trópico, en el centro de Colombia. En la región de Cataluña (España) se han encontrado 148 RLS, mientras que en la región de Barrancabermeja (Colombia) resultaron 916 RLS tras aplicar un umbral de corriente (>30 kA en el 3er cuartil). Gracias al uso de este filtro de corriente en Colombia, se han identificado con mayor facilidad RLS singulares (p. ej., torres altas). La fiabilidad de determinar un RLS concreto en ambas regiones se ha evaluado mediante un análisis de Monte Carlo en el que la probabilidad de encontrar un RLS aleatorio es inferior al 1,2 %. Las ubicaciones del RLS no están necesariamente relacionadas con la GFD más alta.

En Cataluña el 13 % de los RLS han estado relacionados con torres de comunicación y un aerogenerador, el 84 % se encuentra en zonas montañosas, mientras que el 5 % de RLS se encuentran en el mar. Los RLS relacionados con torres altas suponemos que están dominados por rayos ascendentes, ya que las estadísticas de las corrientes máximas de los RS son similares a las de la región con una disminución en el 3er cuartil, y

también por la distribución estacional de la ocurrencia de rayos durante todo el año, incluido el invierno. Contrariamente, los rayos en RLS en las regiones montañosas se distribuyen de manera muy similar a lo largo de los meses como ocurren en la región en general. Además, las estadísticas de picos de corriente no difieren de las de la región. Por lo tanto, consideramos que la actividad de rayos en estos RLS está dominada por rayos CG descendentes.

En Barrancabermeja (Colombia), las estadísticas de corrientes máximas de descarga de rayos en el RLS sugieren que la actividad de rayos CG en el RLS está dominada por rayos descendentes. Se han encontrado algunos RLS relacionados con torres altas y algunos relacionados con terrenos escarpados. Se ha demostrado que el método RLS es una herramienta útil para identificar qué estructuras altas son las más afectadas por los rayos en un clima de rayos tropicales donde la mera GFD no resalta estos sitios. Lamentablemente, al no poder acceder a información geográfica de las torres de la región, junto con la baja resolución de las imágenes satelitales públicas en esta zona, limitó el análisis más detallado.

Se ha encontrado que muchos RLS podrían estar relacionados con algunas características de la orografía. En Cataluña (España), ~70 % de las RLS están ubicadas en áreas clasificadas como terreno escarpado y muy escarpado (p. ej., picos de montañas). En Barrancabermeja (Colombia) muchos RLS se han relacionado con terrenos escarpados como picos de montañas, crestas y bordes escarpados de mesetas. En Cataluña, la mayor actividad de rayos se encuentra en las zonas de montaña. Estas áreas favorecen la convección orográfica y también los rayos ascendentes. Mientras que, en Barrancabermeja (Colombia), la actividad de las tormentas es mucho más alta que en Cataluña (España) y en una atmósfera más cálida con regiones de carga eléctrica de tormentas más altas que favorecen los rayos descendentes. Esto también se demuestra con el análisis de las altitudes de los sitios RLS. En Cataluña (España), la altitud mediana del RLS es de 2403 m, mientras que en Barrancabermeja la mediana se encuentra a tan solo 175 m.

El 5 % de los RLS en Cataluña (España) se han ubicado en el mar a lo largo de las rutas marítimas de Barcelona. La distancia de estos RLS a la costa sugiere que estos podrían no estar relacionados con boyas o embarcaciones fondeadas, sino más bien con embarcaciones en ruta. Se ha encontrado que las corrientes máximas de los rayos en estos RLS son más altas que en la región general (principalmente tierra). Esto podría deberse al efecto de la unión de los líderes descendentes por estructuras altas (embarcaciones en este caso) o a las propiedades del agua de mar.

Los RLS podrían ser de interés para actividades que se ven directamente afectadas por los rayos, como empresas de energía eólica, torres de comunicación o sistemas de transmisión y distribución de energía eléctrica. El concepto de RLS también se puede adoptar fácilmente como parte de la evaluación de riesgos y el mantenimiento preventivo. Sin duda, la información sobre los RLS será atractiva para las compañías de seguros.

Por todo lo expuesto anteriormente, este estudio responde la primera pregunta de investigación.

El concepto de RLS se complementa y añade información de recurrencia de impactos de rayos en el tiempo a la GFD. Actualmente la GFD es el único elemento que, en la normativa específica de protección frente al rayo, aporta información de la actividad de rayos específica de la zona. Sin embargo, a partir de los LLS también se conocen las intensidades del rayo, por eso se planteó la segunda pregunta de investigación:

2. ¿Qué zonas geográficas acumulan los impactos de rayo de intensidad más alta?

En el estudio de densidad de corrientes extremas, que se ha llevado a cabo en el capítulo 7, con el área de estudio en Cataluña, se ha visto que las zonas con más actividad de rayos de corriente extrema son el mar y las zonas de alta montaña como Pirineos y Prepirineos. El comportamiento difiere según la polaridad: los rayos extremos negativos se localizan en estas dos zonas de gran actividad mientras que los rayos extremos positivos en los Pirineos y Prepirineos. Este comportamiento sucede sobre todo en los meses entre abril y octubre, que coincide con los meses de más actividad de rayos de la región. Los rayos extremos positivos se concentran en las zonas más montañosas, a comparación de los rayos positivos sin filtros de corrientes, que se distribuyen por todo el territorio. Como hipótesis se indica que quizás en las montañas, al quedar más cerca de las nubes, especialmente en invierno, el canal del rayo es más corto y puede favorecerlos. Otra hipótesis es si las tormentas de montaña favorecen los rayos positivos. Hay un 0.08 % del total de *flashes* extremos negativos tiene una corriente inferior a -200kA y un 0.25% de los extremos positivos su corriente supera los 200 kA, quizás algunos de estos *flashes*, con más análisis que incluyeran datos de satélite para comprobar su energía asociada, podrían ser clasificados como *superbolts*.

Las zonas de intensidades extremas también son interesantes para los estándares de protección frente al rayo. Se podría desarrollar algún tipo de factor geográfica en un futuro para que tuviera en cuenta si la instalación a proteger, como p. ej. un parque eólico, se encuentra en zona de corrientes extremas. Con este estudio queda contestada la segunda pregunta de investigación en la zona de Cataluña.

La tercera y última pregunta de investigación va enfocada a mejorar el análisis posterior a cuando hay daños por rayos en aerogeneradores, pero también se podría tener en cuenta para la normativa de protección contra el rayo en aerogeneradores.

3. ¿Qué características tienen los rayos detectados por un LLS que dañan aerogeneradores y que aparecen en informes de análisis causa-raíz de casos reales?

El estudio de rayos que han afectado aerogeneradores del capítulo 6 verifica que los daños pueden suceder durante todo el año en España, pero especialmente fuera de la temporada de más rayos. Cabe destacar los rayos de invierno que pueden ser iniciados por la propia estructura, que, aunque la amplitud de corriente sea menor, pueden ser muy energéticos. Se confirma que un LLS preciso es muy útil para verificar si el daño fue causado por rayo, ya que en la mayoría de casos se detectan rayos en las inmediaciones del aerogenerador y en los tres días anteriores a la fecha indicada por la compañía eólica. Pocos rayos son de alta intensidad. También, se observa que, separando los rayos por estacionalidad, clasificando los casos por si ocurren en meses de rayos de invierno, el resultado es demasiado genérico y quedan clasificados como rayos de invierno, tormentas que no tienen estas características. Los casos de rayos en octubre, ninguno cumplía estas condiciones de invierno. El filtro para clasificar que los rayos cumplen condiciones de invierno que se ha encontrado, correspondiente a temperaturas inferiores a -7.95°C en la isóbara de 700 hPa.

En los rayos asociados a tormentas de fuerte convección la polaridad es mayormente positiva, que contrasta con la proporción habitual de este tipo de tormentas, que es bastante más reducida. Una hipótesis podría ser un error de clasificación, donde el LLS detectase la parte IC del rayo, como CG, que se reforzaría con el hecho de que en todos los casos el rayo más cercano al aerogenerador es de tipo CG, excepto un caso que no tuvo clasificación.

Con esta información se pueden mejorar los informes de análisis de causa-raíz de cuando se producen rayos en aerogeneradores por rayos y contribuye al conocimiento de los rayos que dañan en los aerogeneradores, respondiendo así la tercera pregunta de investigación.

Esta tesis ha contribuido también a la instalación de una red de sensores de detección de rayos en la Península Ibérica y a crear una base de datos del histórico de los datos de rayos, tal como se explica en el capítulo 3. Gracias a ello, se han obtenido datos de rayos para múltiples estudios y publicaciones no sólo locales, si no que, al ser una red europea, los sensores de la Península contribuyen a la detección de rayos de los países cercanos (como p. ej. Francia, Italia, Marruecos o el Reino Unido) y estos datos de rayos se han utilizado en proyectos europeos como p. ej. la misión ASIM, un observatorio del clima para la ISS.

Con la herramienta de cálculo de la DE para LLS, basada en el método gráfico de la distribución de corrientes, expuesto en CIGRE TF C4.404A (2009) del capítulo 4, se ha obtenido una forma de encontrar la DE relativamente ágil y versátil, que se puede adaptar a los LLS de diferentes características.

En general, se han respondido las preguntas de investigación y se han alcanzado los objetivos planteados inicialmente.

8.1 Trabajo futuro

Los resultados de esta tesis pueden considerarse en futuros trabajos de investigación. Se proponen algunas mejoras y ampliación. También se tienen en cuenta posibles aplicaciones de la industria.

Se proponen los siguientes trabajos futuros:

- Ampliación y manutención de la red LINET de la Península Ibérica. Después de 15 años de iniciar la base de datos de histórico de rayos en la Península, continuar actualizando la base de datos. Hay zonas a mejorar la cobertura, como el sur y el oeste de la Península. También formaría parte reemplazar los componentes de los sensores existentes, cuando quedan obsoletos.
- Ampliar a otras zonas de estudio el concepto de RLS.
- Hacer un estudio de los RLS en el mar, pues no queda claro su origen.
- En la investigación de la distribución geográfica de corrientes extremas, podría ser interesante estudiar si ocurre en otras zonas que también tengan mar, o si es propio del comportamiento de las tormentas en el mar Mediterráneo.
- La corriente pico de la RS del rayo es importante en el cálculo de sobretensiones en las líneas eléctricas de transmisión y distribución. Teniendo en cuenta los resultados de la distribución de corrientes extremas, se podría desarrollar un factor geográfico en un estudio futuro para que se tuviera en cuenta a la hora de calcular estas sobretensiones.
- En los estándares de protección contra el rayo, que actualmente se basan en la GFD podrían también tener en cuenta si el equipo a proteger está en una zona de alta actividad de corrientes extremas o un RLS.

9 Bibliografía

- Albrecht, R., Goodman, S., Buechler, D., Blakeslee, R., & Christian, H. (2016). Where Are the Lightning Hotspots on Earth? *Bulletin of the American Meteorological Society*. 97. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00193.1>.
- Aldis. Web corporativa de Aldis (2023, 25 de julio). <https://www.aldis.at/en/lightning-research/lightning-research-at-gaisberg/current-measurement/>
- Aranguren, D., López, J., Inampué, J., Torres H., & Betz, H-D. (2017). Cloud-to-ground lightning activity in Colombia and the influence of topography . *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Volume 154. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2016.08.010>.
- Aranguren, D., López, J., Inampué, J., Torres, H., & Betz, H-D. (2014). Overview of the cloud-to-ground lightning activity in Colombia. 6th International Conference on Grounding and Earthing and 6th International Conference on Lightning Physics and Effects, Manaus, Brazil. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2016.08.010>.
- Araujo, L. S., Guimaraes, M. B., Pedrosa, A. G., Murta Vale, M. H., & Visacro, S. (2012). Assessing events of upward lightning measured at Morro do Cachimbo Station. 2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP). <https://doi.org/10.1109/iclp.2012.6344331>
- Asfur, M., Price, C., Silverman, J. & Wishkerman, A. (2020). Why is lightning more intense over the oceans? *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Volume 202, <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105259>.
- Asfur, M., Price, C., Yair, Y. et al. (2023). Spatial variability of lightning intensity over the Mediterranean Sea correlates with seawater properties. *Sci Rep* 13, 5834 <https://doi.org/10.1038/s41598-023-33115-0>
- Asfur, M., Silverman, J. & Price, C. (2020). Ocean acidification may be increasing the intensity of lightning over the oceans. *Sci Rep* 10, 21847 <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79066-8>
- Asociación Empresarial Eólica. Mapa de parques eólicos. <https://aeolica.org/sobre-la-eolica/mapa-de-parques-eolicos>
- Bauer, L. & Matysik, S. (2023). Portal web con características de los modelos de aerogeneradores de la mayoría de fabricantes del mercado. <https://es.wind-turbine-models.com/>

- Bazelyan, E. M, Gorin, B. N., & Levitov, V. I. (1978). *Physical and Engineering Foundations of Lightning Protection*, 223 p., Leningrad: Gidrometeoizdat.
- Berger, K. (1972). *Methoden und Resultate der Blitzforschung auf dem Monte San Salvatore bei Lugano in den Jahren 1963-1971*. Bull. Schweiz. Elektrotech 63: 1403-22.
- Berger, K., Anderson, R. B., & Kroninger, H. (1975). Parameters of lightning flashes. *Electra*, 80, 23-37.
- Better Plan. Better Plan, Wisconsin (2023, 14 de julio). <http://betterplan.squarespace.com/todays-special/2009/7/3/7209-if-a-wind-turbine-blade-explodes-in-a-german-forest-and.html>
- Betz H. D., Schmidt K, Oettinger WP (2009a) LINET-An international VLF/LF lightning detection network in Europe. In: *Lightning: principles, instruments and applications*. Springer, Dordrecht, pp 115–140
- Betz, H. D., Schmidt K., Laroche, P., Blanchet, P., Oettinger, W. P., Defer, E., Dziewit, Z. , Konarski, J. (2009b) LINET—An international lightning detection network in Europe. *Atmospheric Research*, Vol. 91, Issues 2–4, Pages 564-573, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2008.06.012>.
- Betz, H. D., Schmidt, K., Oettinger, W. P., & Wirz M. (2004). Lightning detection with 3-D discrimination of intracloud and cloud-to-ground discharges. *Geophysical Research Letters*, Vol.31, L11108, June 2004. <https://doi.org/10.1029/2004GL019821>.
- Bills, J. R., Thompson, E. M., Uman, M. A., & Mackeras, D. (1988). Electric field pulses in close lightning cloud flashes. *Journal of Geophysical Research*, vol. 93, p. 15933-15940.
- Bourscheidt, V., Pinto, O., Naccarato, K. P., & Pinto, I. R. C. A. (2009). The influence of topography on the cloud-to-ground lightning density in South Brazil. *Atmos. Res.*, 91, 508–513, <https://doi.org/doi:10.1016/j.atmosres.2008.06.010>.
- Braam, H., Ramakers, S., Rademakers, L., Wessels, H.R., Prins, R., Lok, R., & Leunis, L. (2002). *Lightning Damage of OWECs Part 3: Case Studies*.
- Christian, H. J., Blakeslee, R.J., & Goodman, S.J. (1989). The detection of lightning from geostationary orbit. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Wiley Online Library.
- Christian, H. J., et al. (2003). Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector. *J. Geophys. Res.*, 108 (D1), 400.5, <https://doi.org/doi:10.1029/2002JD002347>, 2003.
- CIGRE TB 549. (2013). *Lightning Parameters for Engineering Applications*, WG C4.407, V.A. Rakov, Convenor (US), A. Borghetti, Secretary (IT), C. Bouqueneau (BE), W.A. Chisholm (CA), V. Cooray (SE), K. Cummins (US), G. Diendorfer (AT), F. Heidler (DE), A. Hussein (CA), M. Ishii (JP), C.A. Nucci (IT), A. Piantini (BR), O. Pinto, Jr. (BR), X. Qie (CN), F. Rachidi (CH), M.M.F. Saba (BR), T. Shindo (JP), W. Schulz (AT), R. Thottappillil (SE), S. Visacro (BR), W. Zischank (DE), 117 p.

- CIGRE TF C4.404A. (2009) Cloud-to-Ground Lightning Parameters derived from Lightning Location Systems. The Effects of System Performance.
- CIGRE WG 33.01, Report 63. (1991). Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines.
- Cooray, V., Rakov, V., & Theethayi, N. (2007). The lightning striking distance—revisited. *J. Electrostat.*, 65 (5–6), pp. 296-306, <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2006.09.008>
- Cummins, K. & Murphy, M. (2009). An Overview of Lightning Locating Systems: History, Techniques, and Data Uses, With an In-Depth Look at the U.S. NLDN. *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on.* 51. 499 - 518. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2009.2023450>
- Cummins, K. L. (2012). On the relationship between terrain variation and LLS-derived lightning parameters. 2012 Int. Conf. on Lightning Protection (ICLP), Vienna, Austria, Vienna University of Technology., 9 pp.
- Cummins, K. L., Murphy, M. J., Bardo, E.A., Hiscox, W.L., Pyle, R.B., & Pifer, A.E. (1998). A Combined TOA/MDF Technology Upgrade of the U.S. National Lightning Detection Network. *Journal of Geophysical Research*, 103, 9035-9044.
- Diendorfer, G. (2015). On the risk of upward lightning initiated from wind turbines. 2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering, EEEIC 2015 - Conference Proceedings. 872-876. <https://doi.org/10.1109/EEEIC.2015.7165278>
- Diendorfer, G.. (2010). LLS performance validation using lightning to towers. ILDC 2010. <https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/1.Keynote-Diendorfer.pdf>
- Diendorfer, G., Hadrian, W., Hofbauer, F., Mair, M., & Schulz, W. (2002). Evaluation of Lightning Location Data Employing Measurements of Direct Strikes to a Radio Tower, GIGRE Session, Paris.
- Diendorfer, G., Pichler, H., & Mair, M. (2009). Some parameters of negative upward initiated lightning to the Gaisberg Tower (2000–2007). *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 51, no. 3, pp. 443-452.
- Diendorfer, G., Pichler, H., & Mair, M. (2009). Some Parameters of Negative Upward-Initiated Lightning to the Gaisberg Tower (2000–2007). *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on.* 51. 443 - 452. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2009.2021616>
- Diendorfer, G., Zhou, H., & Pichler, H. (2011). Review of 10 years of lightning measurements at the Gaisberg tower in Austria. *Proc. Int. Symp. Winter lightning, Sapporo, Japan, 2011*, pp. 185–190.
- Enno, S.E, Sugier, J., Alber, R., & Seltzer, M. (2020). Lightning flash density in Europe based on 10 years of ATDnet data. *Atmospheric Research, Volume 235*. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104769>

FAO. (2006). Guidelines for soil description. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2006, pp. 67-71. <http://www.fao.org/3/a-a0541e.pdf>

Garolera, A., Madsen, S., Nissim, M., Myers, J., & Holboell, J. (2014). Lightning Damage to Wind Turbine Blades From Wind Farms in U.S.. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 31. 1-1. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2014.2370682>

Global Wind Energy Council (2022). Global Wind report 2022. <https://gwec.net/global-wind-report-2022/>

Google Earth Maps. <https://www.googleearth.com/>

Guha, A., Liu, Y., Williams, E., Schuman, C., & Hunt H. Lightning detection and warning. *Lightning: science, engineering, and economic implications for developing countries*. Gomes, C. (2021). Singapore: Springer. ISBN 981-16-3440-8.

Hachiya, K., Hyodo, H. and Honjo, N. (2008). Lightning strike aspect for wind turbines in winter season – Observation results at Nikaho wind park in Japan’. *Proc. Int. Conf. Lightning Protection*, Uppsala, Sweden, 2008.

Hersbach, H, Bell, B, Berrisford, P, et al. The ERA5 global reanalysis. *Q J R Meteorol Soc*. 2020; 146: 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>

Holle, R. L., Brooks, W. A., & Cummins, K. L. (2021). Lightning Occurrence and Casualties in U.S. National Parks, *Weather, Climate, and Society*, 13(3), 525-540. <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-19-0155.1>

Holle, R.L. (2016) A summary of recent national-scale lightning fatality studies. *Weather, Climate, and Society*, 8(1), 35–42. <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-15-0032.1>

Holzworth, R. H., McCarthy, M. P., Brundell, J. B., Jacobson, A. R., & Rodger, C. J. (2019). Global distribution of superbolts. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, 9996–10005. <https://doi.org/10.1029/2019JD030975>

Idone, V. P., Davis, D. A., Moore, P. K., Wang, Y., Henderson, R. W., Ries, M., & Jamason, P. F. (1998), Performance evaluation of the U.S. National Lightning Detection Network in eastern New York: 2. Location accuracy, *J. Geophys. Res.*, 103(D8), 9057–9069, <https://doi.org/10.1029/98JD00155>.

IEC 61400-24:2010 Wind Turbine Generator Systems - Part 24: Lightning Protection.

IEC 62305-1:2006 Protection against lightning - Part 1: General principles.

IEC Standard 62305-1. 2010. Protection against lightning - Part 1: General principles, Edition 2.0.

IEEE Standard 1243-1997. 1997. IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines.

- IEEE Standard 1410-2010. 2010. IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines.
- IEEE, Parameters of Lightning Strokes: A Review, IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 20, NO. 1, JANUARY 2005.
- Kehoe, K. E., & Krider, E. P. (2004). NLDN performance in Arizona, 18th International Lightning Detection Conf., Vaisala Oyj, Helsinki, Finland, Paper 50.
- Keraunos. (2016). Red Colombiana de Localización de rayos LINET. Ficha técnica. Disponible en: [https://16557801101891546621.googlegroups.com/attach/610c7f091a9ac/Red%20Colombiana%20de%20Localicaci%C3%B3n%20de%20rayos%20LINET%20\(2016\)_01.pdf?part=0.2&vt=ANaJVrFKaMMLHFwNjHr9M9Pg90VR2iPOoHbpTrHt8zXAJFKb3YdNOIVcFPUpAieWZ3CRxmYG3VYt3iOxdR2fjtf_YYBgShkF9ZDmom2zNO0V00biFCoMk3s](https://16557801101891546621.googlegroups.com/attach/610c7f091a9ac/Red%20Colombiana%20de%20Localicaci%C3%B3n%20de%20rayos%20LINET%20(2016)_01.pdf?part=0.2&vt=ANaJVrFKaMMLHFwNjHr9M9Pg90VR2iPOoHbpTrHt8zXAJFKb3YdNOIVcFPUpAieWZ3CRxmYG3VYt3iOxdR2fjtf_YYBgShkF9ZDmom2zNO0V00biFCoMk3s)
- Kingfield, D. M., Calhoun, K. M., & de Beurs, K. M. (2017). Antenna structures and cloud-to-ground lightning location: 1995–2015, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 5203– 5212. <https://doi.org/10.1002/2017GL073449>.
- Kitagawa, N., & Brook, M. (1960) A comparison of intracloud and cloud-to-ground lightning discharges. *Journal of Geophysical Research*, 65 (4). 1189-1201 <https://doi.org/10.1029/jz065i004p01189>
- Kochtubajda, B., & Burrows, W. (2010). A Decade of Cloud-to-Ground Lightning in Canada: 1999-2008. Part 2: Polarity, Multiplicity and First-Stroke Peak Current. *Atmosphere-ocean - ATMOS OCEAN*. 48. 195-209. <https://doi.org/10.3137/AO1119.2010>
- Kotroni, V., & Lagouvardos, K. (2008). Lightning occurrence in relation with elevation, terrain slope, and vegetation cover in the Mediterranean, *J. Geophys. Res.*, 113, D21118, <https://doi.org/10.1029/2008JD010605>
- Krehbiel, PR. (1986). The electrical structure of thunderstorms. In: Krider EP, Roble RG (eds) *The Earth's electrical environment*. National Academy Press, Washington, D.C., pp 90–113.
- La Gisteria (2023, 1 de marzo). Mapa de parques eólicos en España. https://lagisteria.com/mapa-web/mapa_eolicos/eolicos.html
- Light, T.E.L., Davis, S.M., Boeck, W., & Jacobson, A.R. Global nighttime lightning flash rates and characteristics observed with the FORTE satellite. Los Alamos National Laboratory technical report.
- Lightning Current Recorders. *Nature* 132, 309 (1933). <https://doi.org/10.1038/132309a0>
- Lin, Y.T., Uman, M.A., Tiller, J.A., Brantley, R.D., Beasley, W.H., Krider, E.P., & Weidman, C.D. Characterization of lightning return stroke electric and magnetic fields from simultaneous two-station measurements. *Journal of Geophysical Research*, 1979, vol. 84 (C10), p. 6307-14.

- Liu, Y., Guha, A., Said, R., Williams, E., Lapierre, J., Stock, M., & Heckman, S. (2020). Aerosol effects on lightning characteristics: A comparison of polluted and clean regimes. *Geophysical Research Letters*, 47. <https://doi.org/10.1029/2019GL086825>
- Love, E.R. (1973). *Improvements on Lightning Stroke Modeling and Applications to the Design of EHV and UHV Transmission Lines*, University of Colorado.
- Lyons, W. A., Armstrong, R. A., Bering, E. A., & Williams, E. R. (2000). The hundred year hunt for the sprite, *Eos Trans. AGU*, 81(33), 373–377. <https://doi.org/10.1029/00EO00278>
- Lyons, W., Nelson, T., Williams, ER., Cramer, J.A., & Turner, TR. (1998). Enhanced positive cloud-to-ground lightning in thunderstorms ingesting smoke from fires. *Science (New York, N.Y.)*. 282. 77-80.
- MacGorman, D. R., & Rust, W. D. (1998). *The electrical nature of storms*. Oxford University Press, USA.
- Mach, D. M., MacGorman, D. R., Rust, W. D., & Arnold, R. T. (1986). Site errors and detection efficiency in a magnetic direction finder network for locating lightning strikes to ground, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 3.67-74.
- March, V. (2015). Upward lightning observations on a wind turbine and its implications to environmental factor for risk assessment. *Asia-Pacific International Conference on Lightning*.
- March, V. (2016). Lightning risk assessment to wind turbines: Methodology and guidelines. 2016 33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP). Estoril, Portugal, 2016, pp. 1-8, <https://doi.org/10.1109/ICLP.2016.7791381>
- March, V., 2017. Key issues to define a method of lightning risk assessment for wind farms. *Electr. Power Syst. Res.* <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.08.020>
- Matsui, T., Yamamoto, K., Ogata, J. Anomaly detection for wind turbine damaged due to lightning strike, *Electric Power Systems Research*, Volume 209,2022,107918, ISSN 0378-7796, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.107918>
- Miki, M., Miki, T., Wada, A., Asakawa, A., Asuka, Y. & Honjo, N. (2010). Observation of lightning flashes to wind turbines. In proceedings of 30th International Conference on Lightning Protection (ICLP), Cagliari, Italy.
- Montanyà, J, Soula, S., Diendorfer, G., Solà, G., & Romero, D. (2007). Analysis of altitude of isotherms and the electrical charge for flashes that struck the Gaisberg Tower, 13th International Conference on Atmospheric Electricity (ICAE), 2007, Beijing, China.
- Montanyà, J. (2016). Lightning interaction and damages to wind turbines. Proceedings Russian Conference on Lightning Protection. Proceedings V Russian Conference on Lightning Protection. Saint-Petersburg.

- Montanyà, J. et al. (2022). Potential use of space-based lightning detection in electric power systems, *Electric Power Systems Research*, vol. 213, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108730>.
- Montanya, J., Fabró, F., van der Velde, O., & Hermoso, B. (2011). Sprites and Elves as proxy of energetic lightning flashes in winter. What we can learn from mesosphere, 3rd International Symposium on Winter Lightning (ISWL2011), Japan.
- Montanyà, J., Fabró, F., van der Velde, O., March, V., Williams, E. R., Pineda, N., Romero, D., Solà, G., & Freijo, M. (2016). Global distribution of winter lightning: a threat to wind turbines and aircraft, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 16, 1465–1472, <https://doi.org/10.5194/nhess-16-1465-2016>
- Montanyà, J., López, J., Morales, C., Van Der Velde, O., Fabro, F., Pineda, N., Navarro, J., Reglero, V., Neubert, T., Chanrion, O., Goodman, S., Ostgaard, N., Ladino, A., Romero, D., Sola, G., Horta-Bernús, R., Freijo, M. (2021). A simultaneous observation of lightning by ASIM, Colombia-Lightning Mapping Array, GLM, and ISS-LIS. *Journal of geophysical research: atmospheres*. Volum: 126. Número: 6. Pàgs.: 1-17. <https://doi.org/10.1029/2020JD033735>
- Montanyà, J., López, J., Van Der Velde, O., Sola, G., Romero, D., Morales, C., Visacro, S., Saba, M., Goodman, S., Williams, E.R., Peterson, M., Pineda, N., Sousa, M., Aranguren, D. (2022). Potential use of space-based lightning detection in electric power systems. *Electric power systems research*. Vol. 213, 108730, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108730>
- Montanya, J., Soula, S., Diendorfer, G., Solà, G., Romero, D. (2007). Analysis of the altitude of the isotherms and the electrical charge for flashes that struck the Gaisberg Tower. 13th International Conference on Atmospheric Electricity.
- Montanyà, J., van der Velde, O., & Williams, E. R. (2014). Lightning discharges produced by wind turbines, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119, 1455– 1462, <https://doi.org/10.1002/2013JD020225>
- Nag, A., Murphy, M. J., Schulz, W., & Cummins, K. L. (2015). Lightning locating systems: Insights on characteristics and validation techniques. *Earth and Space Science*, 2(4), 65-93.
- Neubert, T., Østgaard, N., Reglero, V., Blanc, E., Chanrion, O., Oxborrow, C., Orr, A., Tacconi, M., Hartnack, O. & Bhandari, D. (2019). The ASIM Mission on the International Space Station. *Space Science Reviews.*, 215. <https://doi.org/10.1007/s11214-019-0592-z>.
- Thornton, J. A., Virts, K. S., Holzworth, R. H., & Mitchell, T. P. (2017). Lightning enhancement over major oceanic shipping lanes, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 9102– 9111, <https://doi.org/10.1002/2017GL074982>.
- nowcast GmbH. Web corporativa de nowcast GmbH (2023, 17 de abril). <https://www.nowcast.de/es/deteccion-de-rayos/el-diseo-exclusivo-de-linet/>
- Oda P. S. S., P., Diego P., Enoré, D.P., Mattos, E. V., Gonçalves, W. A., Albrecht, R. I. (2022). An initial assessment of the distribution of total Flash Rate Density (FRD) in Brazil from GOES-16 Geostationary

Lightning Mapper (GLM) observations, *Atmospheric Research*, Volume 270, 106081, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106081>.

Orville, R. E. (1987). An analytical solution to obtain the optimum source location using multiple direction finders on a spherical surface, *J. Geophys. Res.*, 92, (D9), 10877–10886, <https://doi.org/10.1029/JD092iD09p10877>

Orville, R. E., & Huffines, G. R. (2001), Cloud-to-ground lightning in the United States: NLDN Results in the first decade, 1989–98, *Mon. Weather Rev.*, 129, 1179–1193, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2001\)129<1179:CLGLUS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2001)129<1179:CLGLUS>2.0.CO;2)

Peterson, M. (2019). Research applications for the Geostationary Lightning Mapper operational lightning flash data product. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, 10205–10231. <https://doi.org/10.1029/2019JD031054>.

Peterson, M. et al. (2022). New WMO certified megaflash lightning extremes for flash distance (768 km) and duration (17.01 seconds) recorded from space. "Bulletin of the American Meteorological Society", 1, vol. 103, núm. 5, p. 257-261.

Peterson, M., Mach, D., & Buechler, D. (2021). A Global LIS/OTD Climatology of Lightning Flash Extent Density. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 126. <https://doi.org/10.1029/2020JD033885>

Pichler, H., Diendorfer, G., & Mair, M. (2022). Statistics of lightning current parameters measured at the Gaisberg Tower. *International Lightning Detection Conference*, 18, ref. 64.

Pineda, N., Figueras i Ventura, J., Romero, D., Mostajabi, A., Azadifar, M., Sunjerga, A., et al. (2019). Meteorological aspects of self-initiated upward lightning at the Säntis tower (Switzerland), *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019; 124: 14162–14183. <https://doi.org/10.1029/2019JD030834>

Pineda, N., Montanyà, J., Salvador, A., van der Velde, O., & López, J. A. (2018). Thunderstorm characteristics favouring downward and upward lightning to wind turbines. *Atmospheric Research*, Volume 214, 1 December 2018, Pages 46-63, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.07.012>

Pinto, I., Pinto Jr, O., Campos, D., & Naccarato, K. (2009). Climatology of large peak current cloud-to-ground lightning flashes in the Southeast Brazil. *J. Geophys. Res.* <https://doi.org/10.1029/2009JD012029>

Poelman, D.R., Schulz, W., Diendorfer, G., & Bernardi, M. (2016). The European lightning location system EUCLID – part 2: Observations. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 16., 2016607–616. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-607-2016>

Proctor, D. E. (1981). VHF Radio Pictures of Cloud Flashes. *Journal of Geophysical Research*, vol. 86, p. 4041–4071.

Rachidi F, Rubinstein, M., Montanyà, J., Bermudez, J.L., Rodriguez, R., Solà, G., Korovkin, N. (2008). A Review of Current Issues in Lightning Protection of New-Generation Wind-Turbine Blades, *IEEE*

- Transactions on Industrial Electronics, vol. 55, no. 6, pp. 2489-2496, June 2008, <https://doi.org/10.1109/TIE.2007.896443>
- Rachidi, F. (2007). Modeling Lightning Return Strokes to Tall Structures: A Review. *Journal of Lightning Research*, vol. 1, pp. 16-31.
- Rachidi, F., & Thottappillil, R. (1993). Determination of lightning currents from far electromagnetic fields, *J. Geophys. Res.* 98, 18315–18320.
- Rachidi, F., Bermudez, J.L., Rubinstein, M., & Rakov, V.A. (2004). On the estimation of lightning peak currents from measured fields using lightning location systems. *Journal of Electrostatics*. Vol. 60, Issues 2–4, Pages 121-129, <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2004.01.010>.
- Rachidi, F., Rubinstein, M. (2022). Säntis lightning research facility: a summary of the first ten years and future outlook. *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*. 139. 1-16. <https://doi.org/10.1007/s00502-022-01031-2>.
- Rakov, V. A. (2001). Transient response of a tall object to lightning. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 43, pp. 654-61.
- Rakov, V. A. (2007). *Lightning Physics*. Notes from COST P-18: Training School, Kiten, Bulgaria, Sept. 4-7, CD-ROM.
- Rakov, V. A. (2011). Upward lightning discharges: An update. In *proceedings of 7th Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL)*, pp.304-307, <https://doi.org/10.1109/APL.2011.6110131>.
- Rakov, V. A. (2013). *Atmospheric Electricity*. In *Encyclopedia of Life Support Systems*, UNESCO-EOLSS Publishers.
- Rakov, V. A. (2021). *Lightning, the Science*. *Lightning: science, engineering, and economic implications for developing countries*. Gomes, C. Singapore. Springer. ISBN 981-16-3440-8.
- Rakov, V. A., & Uman, M. A. (2003). *Lightning: Physics and Effects*. 687 pp., Cambridge Univ. Press, New York. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107340886>.
- Rakov, V. A., R. Thottappillil, & M. A. Uman. (1992). On the empirical formula of Willett et al. relating lightning return-stroke peak current and peak electric field. *J. Geophys. Res.* 97: 11527-33.
- Rakov, V.A. and M. A. Uman. (1990). Some properties of negative cloud-to-ground lightning flashes versus stroke order. *J. Geophys. Res.* 95: 5447-53.
- Ripoll, JF., Farges, T., Malaspina, D.M. et al. (2021). Electromagnetic power of lightning superbolts from Earth to space. *Nat Commun* 12, 3553. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23740-6>

- Rivas Soriano, L., de Pablo F., & Tomas C. (2005). Ten-year study of cloud-to-ground lightning activity in the Iberian Peninsula, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Volume 67, Issue 16, Pages 1632-1639, <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2005.08.019>.
- Rizk, F. A. M. (1990). Modeling of Transmission Line Exposure to Lightning Strokes. *IEEE Trans. Power Del.* 5: 1983-97.
- Romero, C., Rachidi, F., Paolone, M., Rubinstein, M., & Paolone, M. (2013). Statistical distributions of lightning currents associated with upward negative flashes based on the data collected at the Sántis (EMC) tower in 2010 and 2011. *IEEE Trans. Power Del.*, 28 (3).
- Romero, C., Rachidi, F., Rubinstein, M., Paolone, M., Rakov, V. A., & Pavanello, D. (2013). Positive lightning flashes recorded on the Sántis tower in 2010 and 2011. *Geophys. Res. Atmos.*, 118, 12,879–12,892, <https://doi.org/10.1002/2013JD020242>
- Rudlosky, S. D., Goodman, S. J., Virts, K. S., & Bruning, E. C. (2019). Initial geostationary lightning mapper observations. *Geophysical Research Letters*, 46, 1097–1104. <https://doi.org/10.1029/2018GL081052>
- Rudlosky, S., & Fuelberg, H. (2010). Pre and Postupgrade Distributions of NLDN Reported Cloud-to-Ground Lightning Characteristics in the Contiguous United States. *Monthly Weather Review - MON WEATHER REV.* 138. 3623-3633. <https://doi.org/10.1175/2010MWR3283.1>
- Said, R. K., Cohen, M. B., & Inan, U. S. (2013). Highly intense lightning over the oceans: Estimated peak currents from global GLD360 observations, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, 6905– 6915, <https://doi.org/10.1002/jgrd.50508>
- Said, R. K., Cohen, M. B., & Inan, U. S. (2013). Highly intense lightning over the oceans: Estimated peak currents from global GLD360 observations. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, 6905–6915, <https://doi.org/10.1002/jgrd.50508>.
- Salvador, A., Pineda, N., Montanyà, J., & Sola, G. Seasonal variations on the conditions required for the lightning production. *Atmospheric research.* 2020. Vol. 243. 104981-1 to 104981-11. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104981>
- Salvador, A., Pineda, N., Montanyà, J., López, J., & Sola, G. (2021). Thunderstorm charge structures favouring cloud-to-ground lightning. *Atmospheric research.* Vol. 257. 105577:1-105577:16. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105577>
- San Segundo, H., López, J. A., Pineda, N., Altube, P., & Montanyà, J. (2020) Sensitivity analysis of lightning stroke-to-flash grouping criteria. *Atmospheric Research*, Vol. 242,105023, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105023>.

- Saraiva, A. C. V., Saba, M. M. F., Pinto, O., Cummins, K. L., Krider, E. P., & Campos, L. Z. S. (2010), A comparative study of negative cloud-to-ground lightning characteristics in São Paulo (Brazil) and Arizona (United States) based on high-speed video observations, *J. Geophys. Res.*, 115, D11102, <https://doi.org/10.1029/2009JD012604>
- Schmidt, K. (2007). Ortung und Analyse von Blitzenladungen mittels Registrierung von VLF-Atmospherics innerhalb eines Messnetzes. Dissertation, LMU München: Fakultät für Physik. <https://doi.org/10.5282/edoc.6925>
- Schonland B. F. J. The lightning discharge. *Handb. Phys.*, 1956, vol. 22, p. 576-628.
- Schulz, W. & Diendorfer, G. (1999). Lightning Characteristics as a Function of Altitude Evaluated from Lightning Location Network Data, SAE Technical Paper 1999-01-2310. <https://doi.org/10.4271/1999-01-2310>.
- Schumann, C. et al. (2018). High-speed video observation of lightning flashes over Johannesburg, South Africa 2017 - 2018. 34th International Conference on Lightning Protection. <https://doi.org/1-7.10.1109/ICLP.2018.8503429>.
- Schumann, C., Saba, M.M.F., Warner, T.A., Ferro, M.A.S., Helsdon, J.H. Jr., Thomas, R., & Orville, R.E. (2019) On the Triggering Mechanisms of Upward Lightning. *Sci Rep.* 2019 Jul 3;9(1):9576. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46122>.
- Servei Meteorològic de Catalunya (SMC). (2017). Informe anual d'avaluació de la XDDE 2017. (Not publicly accessible).
- Servei Meteorològic de Catalunya (SMC). (2021). Xarxa de detecció de descàrregues elèctriques atmosfèriques del Servei Meteorològic de Catalunya. Informe resum de l'annualitat 2021. <https://www.meteo.cat/wpweb/climatologia/serveis-i-dades-climatiques/anuaris-de-dades-meteorologiques/xarxa-de-deteccio-de-descarregues-electriques/>
- Sigogne, C. C., Pignolet, P., Reess, T., Ferron, A., Berger, G., Lafon, G., & Serrie, G. (2013). New results at the Pic du Midi lightning station. 2013 International Symposium on Lightning Protection, SIPDA 2013. 1-6. <https://doi.org/10.1109/SIPDA.2013.6729230>.
- Silveira, F. H. Almeida, F. S., & Visacro, S.(2023).Assessing the influence of peak current distributions of first return strokes on the lightning performance of transmission lines: Instrumented tower distributions versus standard distributions.*Electric Power Systems Research*.Vol.214, Part A.<https://doi.org/10.1016/j.eprsr.2022.108822>.
- Simpson, G., & Scrase, F.J. (1937). The distribution of electricity in thunderclouds, *Proc. R. Soc. London*, A161, 309.

- Simpson, George, & G. D. Robinson. (1941). The Distribution of Electricity in Thunderclouds, II, Proc. R. Soc. London, vol. 177, no. 970, pp. 281–329. JSTOR.
- Smorgonskiy, A., Rachidi, F., Rubinstein, M., Diendorfer, G., & Schulz, W. (2013). On the proportion of upward flashes to lightning research towers. *Atmospheric Research* 129, 110-116. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.08.014>.
- Smorgonskiy, A., Tajalli, A., Rachidi, F., Rubinstein, M., Diendorfer, G., & Pichler, H. (2015). An analysis of the initiation of upward flashes from tall towers with particular reference to Gaisberg and Säntis Towers. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 136(A), 46–51. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.06.016>.
- Soto, E., Perez, E., & Herrera, J. (2014). Electromagnetic field due to lightning striking on top of a cone-shaped mountain using the FDTD. *IEEE transactions on electromagnetic compatibility*, 56(5), 1112. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2014.2301138>.
- Soula, S., Georgis, J-F., & Salaün, D. (2019). Quantifying the effect of wind turbines on lightning location and characteristics. *Atmospheric Research*. 221. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.01.010>.
- Soula, S., Kigotsi, J., Georgis, J.F., & Barthe, C. (2016). Lightning climatology in the Congo Basin. *Atmospheric Research*, Volumes 178–179, Pages 304-319. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.04.006>.
- Sunjerga, A. et al. (2020). LMA observations of upward lightning flashes at the Säntis Tower initiated by nearby lightning activity, *Electric Power Systems Research*, Volume 181, 2020, 106067, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.106067>.
- Tran, M.D., & Rakov, V.A. (2015). When does the lightning attachment process actually begin? *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120, pp. 6922-6936, <https://doi.org/10.1002/2015JD023155>
- Trueblood, J. J., Winn, W. P., Krehbiel, P. R., et al. (2012). VHF lightning mapping observations of a triggered lightning flash, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L19807, <https://doi.org/10.1029/2012GL053666>
- Turman, B. N. (1977). Detection of lightning superbolts. *J. Geophys. Res.*, 82(18), 2566–2568. <https://doi.org/10.1029/JC082i018p02566>.
- Uman, M. A. (1974). The Earth and Its Atmosphere as a Leaky Spherical Capacitor. *American Journal of Physics*, 42, 1033–1035.
- Uman, M. A. (2008). *The art and science of lightning protection*. Cambridge University Press.
- Uman, M. A., & McLain, D. K. (1969). Magnetic field of lightning return stroke. *J. Geophys. Res.* 74: 6899-910.
- Uman, M. A., D. K. McLain, & E. P. Krider (1975). The electromagnetic radiation from a finite antenna, *Am. J. Phys.* 43.

- UNE-EN IEC 62858:2019. Densidad del rayo basada en los sistemas de localización de rayos. Principios generales. (2020)
- Villanueva, Y., Rakov, V. A., Uman, M. A., & Brook, M. (1994), Microsecond-scale electric field pulses in cloud lightning discharges, *J. Geophys. Res.*, 99(D7), 14353–14360, <https://doi.org/10.1029/94JD01121>.
- Visacro, S., Murta Vale, M. H., Correa, G., & Teixeira, A. (2010). Early phase of lightning currents measured in a short tower associated with direct and nearby lightning strikes. *J. Geophys. Res.*, 115, D16104. <https://doi.org/10.1029/2010JD014097>.
- Visacro, S., Soares Jr., A., Schroeder, M. A. O., Cherchiglia, L. C. L., & de Sousa, V. J. (2004), Statistical analysis of lightning current parameters: Measurements at Morro do Cachimbo Station, *J. Geophys. Res.*, 109, D01105, <https://doi.org/10.1029/2003JD003662>
- Visacro, S., Guimaraes, M., & Murta Vale, M. H. (2017). Features of upward positive leaders initiated from towers in natural cloud-to-ground lightning based on simultaneous high-speed videos, measured currents, and electric fields. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122, 12,786– 12,800. <https://doi.org/10.1002/2017JD027016>
- Vogt, B. J., & Hodanish, S. J. (2014). A High-Resolution Lightning Map of the State of Colorado, *Monthly Weather Review*, 142(7), 2353-2360. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-13-00334.1>
- Wang, D., & Takagi, N. (2012). Characteristics of winter lightning that occurred on a windmill and its lightning protection tower in Japan. *IEEJ Trans. Power Energy* 132 (6), 568–572. <https://doi.org/10.1541/ieejpes.132.568>
- Wang, D., Takagi, N., Gamerota, W.R., Uman, M.A., Hill, J.D., & Jordan, D.M. (2013). Initiation processes of return strokes in rocket-triggered lightning, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, pp. 9880-9888, <https://doi.org/10.1002/jgrd.50766>
- Watanabe, N, Nag, A., Diendorfer, G., Pichler, H., Schulz, W., & Rassoul, H. (2022). Characterization of the initial stage in upward lightning at the Gaisberg Tower: 1. Current pulses. *Electric Power Systems Research*. 213. <https://doi.org/108626>. 10.1016/j.epsr.2022.108626.
- Williams, E. (2003). Charge structure and geographical variation of thunderclouds. *The Lightning Flash*. Cooray, V. Stevenage: The institution of Electrical Engineers, p. 2-15.
- Williams, E., & Stanfill, S. (2002). The physical origin of the land–ocean contrast in lightning activity, *Comptes Rendus Physique*, Volume 3, Issue 10, Pages 1277-1292, [https://doi.org/10.1016/S1631-0705\(02\)01407-X](https://doi.org/10.1016/S1631-0705(02)01407-X)
- Williams, E.R. (1989). The tripole structure of thunderstorms. *J. Geophys. Res.* 94 (D11), 13,151–13,167.
- Yokoyama S., et al. (2014). Lightning protection of wind turbine blades, *Electra*, 274, 43-45.

Zhou, H., Diendorfer, G., Thottappillil, R., Pichler, H., & Mair, M. (2012a). Measured current and close electric field changes associated with the initiation of upward lightning from a tall tower, *J. Geophys. Res.*, 117, D08102, <https://doi.org/10.1029/2011JD017269>

Zhou, H., Diendorfer, G., Thottappillil, R., Pichler, H., & Mair, M. (2012b). Characteristics of upward positive lightning flashes initiated from the Gaisberg Tower. *J. Geophys. Res.*, 117, D06110, <https://doi.org/10.1029/2011JD016903>

Zhou, H., Theethayi, N., Diendorfer, G., Thottappillil, R., & Rakov, V.A. (2010). On Estimation of the Effective Height of Towers on Mountaintops in Lightning Incidence Studies. *J. Electrostat.* 68: 415-8.

Zoghzy, F. G., Cohen, M. B., Said, R. K., Lehtinen, N. G., & Inan, U. S. (2015). Shipborne LF-VLF oceanic lightning observations and modeling, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120, 10,890–10,902, <https://doi.org/10.1002/2015JD023226>

Anexo I: Procedimiento para el cálculo de la DE

Este documento amplía y detalla el procedimiento para calcular la DE de un LLS descrito en el capítulo 4 de esta tesis.

Los pasos a seguir que se detallan a continuación son:

1. Obtención de datos de rayos
2. Filtrado del primer RS
3. Validación de las corrientes del rayo.
4. Curvas de la distribución acumulada de las corrientes del rayo experimentales.
5. Curvas de referencia de la distribución acumulada de las corrientes del rayo.
6. Ajuste de las curvas de la distribución acumulada de las corrientes del rayo con las de referencia.
7. Obtener la eficiencia de detección para *flashes* y *strokes*.
8. Comprobación de la DE.

1. Obtención de datos de rayos

Para la obtención de datos de rayos se ha de tener en cuenta:

- Los datos deben incluir las corrientes de pico de las descargas (*strokes*).
- Los *strokes* deben agruparse en *flashes*. Cada *stroke* debe estar identificado por orden de ocurrencia para poder filtrar los primeros *strokes*.
- Tamaño de datos y área:
 - La muestra debe ser representativa.
 - Obtener datos de rayos de un LLS de la zona a evaluar de mínimo 1 año.
 - Utilizar un tamaño de cuadrícula de mínimo 20 x 20 km.
 - Verificar que el conjunto de datos contenga como mínimo ~1000 *flashes*. Si no, considerar el aumento del período y/o la ventana.

Los datos de rayos entregados por el proveedor incluirán información de flash (orden temporal de cada *stroke* dentro del *flash*). En caso contrario, los *strokes* se pueden agrupar por *flashes* (ver apartado 2.2.4 de esta tesis).

2. Filtrado del primer RS

El segundo paso separa las primeras RS y las descargas (*strokes*) subsecuentes.

Las primeras RS suelen tener corrientes máximas más altas que las descargas posteriores. Dado que algunos *flashes* tienen algunos picos de corriente IC iniciales altos, es conveniente seleccionar el pico de corriente más alto dentro de un flash. A continuación, se genera una lista de corrientes máximas seleccionando el *stroke* de corriente más alta de cada *flash* individual (en adelante, se llamarán datos de *flashes*). Como se indica en el paso 1 se requiere un mínimo de 1000 *flashes*.

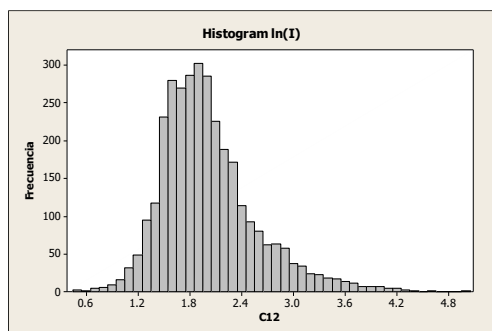
Una vez que se hayan filtrado los picos de corriente más altos dentro del *flash*, se crea una lista de los picos de corriente del resto de los *strokes* (en adelante, se llamará datos de *strokes*).

3. Validación de las corrientes del rayo.

Las corrientes del rayo siguen una distribución estadística log-normal. En este paso se verifica esta condición para que el método sea válido. El procedimiento siguiente se aplica tanto a los datos de *flashes* como a los de *strokes*:

- Seleccionar las corrientes de pico.
- Para cada pico de corriente calcular el valor absoluto.
- Con los valores absolutos de la corriente de pico calcular el logaritmo normal de cada valor.
- Crear un histograma con los números logarítmicos.
- Verificar que los datos se vean distribuidos normalmente. Se puede aplicar la prueba de Kolmogorov-Smirnov pero se requiere una simple inspección visual como en el ejemplo de la Figura 65.
- Si la distribución no parece normal, no se puede aplicar el método. Esto denota algún problema con el conjunto de datos. Entonces, se puede seleccionar un conjunto de datos diferente que coincida con el paso 1.
- Si el histograma tiene una distribución normal, continúe con el Paso 4.

a) **Correcto:** Distribución normal



b) **Incorrecto:** No hay distribución normal de la $\ln(I)$

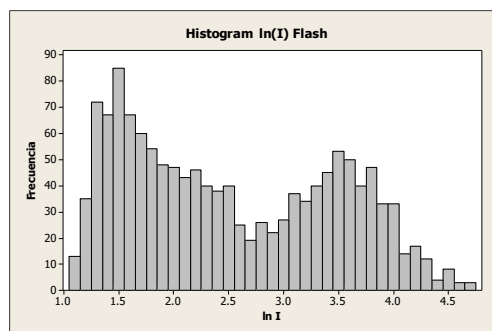


Figura 65. Ejemplo del histograma de corrientes de pico.

4. Curvas de la distribución acumulada de las corrientes del rayo experimentales.

Este paso se hará dos veces, una para el grupo de *flashes* y después para el de *strokes*.

En la hoja de cálculo preparada, copiar la lista de corrientes en la columna A de la hoja "LDS". Tener en cuenta que la posición A1 está reservada para el título. La curva acumulativa se creará en la columna F y se trazará en la figura de la hoja actual. Estas curvas las llamaremos experimentales porque provienen de datos medidos.

5. Curvas de referencia de la distribución acumulada de las corrientes del rayo.

Las curvas de referencia de corriente máxima acumulada son necesarias para el análisis.

Referencia para grupo de *flashes*: Para esta referencia la definición de la curva se obtiene a partir de los valores de CIGRE TF C4.404A (2009). Los valores que definen la distribución de las corrientes máximas de los primeros RS (grupo de *flashes*) son: mediana = 19 kA y $StdevLog = 0,6$. Esta curva acumulativa de referencia se calcula en la hoja de cálculo 'DEFlash.xsl', de la hoja "Reference".

La distribución acumulada de referencia se representa en la figura de la hoja "Reference".

Referencia para grupo de *strokes*: Para esta referencia la definición de la curva se obtiene a partir de valores estadísticos IEC (2006). Los valores que definen la distribución de las corrientes máximas de las descargas (*strokes*) subsecuentes son: mediana = 11,8 kA y $StdevLog = 0,233$. Esta curva acumulativa de referencia se calcula en la hoja de cálculo 'DEStroke.xsl', de la hoja "Reference".

La distribución acumulada de referencia se representa en la figura de la hoja "Reference".

6. Ajuste de las curvas de la distribución acumulada de las corrientes del rayo con las de referencia.

El proceso que se describe a continuación es común para el análisis del grupo de *flashes* y de *strokes*, para cada uno se utiliza la curva preparada anteriormente en la hoja de cálculo correspondiente.

El método se basa en la comparación con la curva de referencia y la preparada con el grupo de datos de corrientes. Este es el paso más crítico de todo el proceso. En el caso más sencillo, ocurre que estas dos curvas se superponen y encajan. La incertidumbre de la DE se obtendría con el porcentaje de corrientes no detectadas. En el ejemplo de la Figura 66 muestra un caso donde la DE experimental es 0.85, por lo que la incertidumbre es del 15 %.

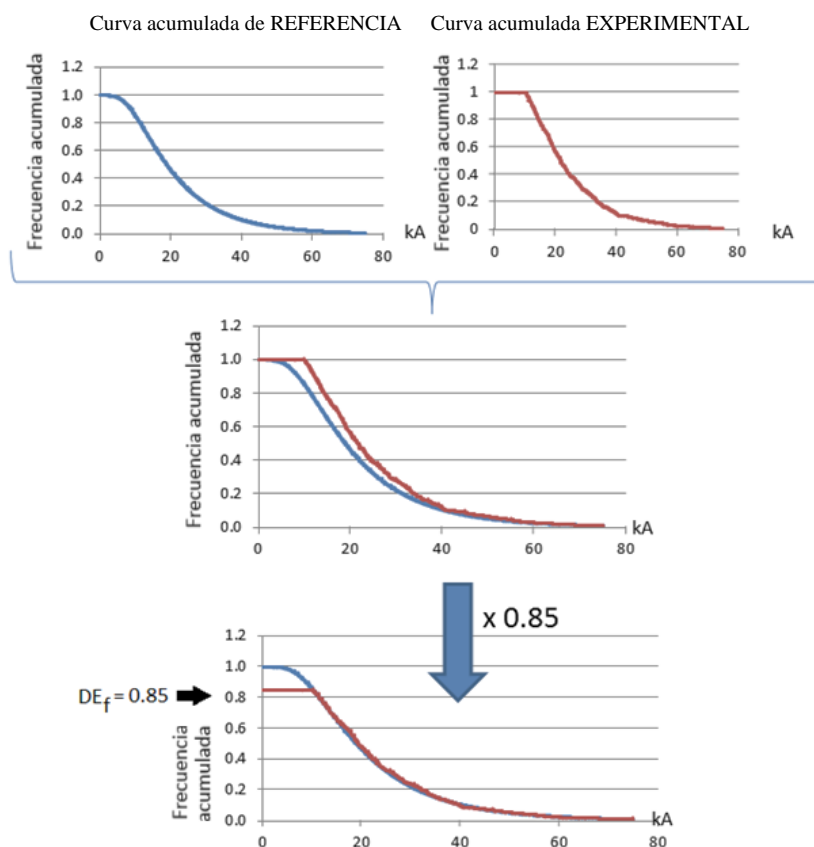


Figura 66. Ejemplo de ajuste de curva de corrientes.

En el caso de la Figura 66, una multiplicación de un factor de 0.85 a la curva acumulativa de referencia produce el resultado de que las curvas encajen, ya que la curva experimental tiene una calibración distinta.

Procedimiento de ajuste con hoja de cálculo:

- 1.- Ir a la hoja de Ajustes.
- 2.- Establecer los valores iniciales de escalado.

Celda D2: expandir o contraer (multiplicar) los ejes de corriente de la corriente acumulativa experimental. Inicialmente establecido en 1.

Celda E2: Desplazamiento horizontal (suma) de la corriente acumulativa experimental. Inicialmente establecido en 0. Este número puede ser positivo o negativo.

Celda G2: expandir o contraer (multiplicar) los ejes de eficiencia de la corriente acumulada experimental. Inicialmente establecido en 1.

Celda H3: Desplazamiento vertical (suma) de la curva acumulativa experimental. Inicialmente establecido en 0. Este número puede ser positivo o negativo.

3.- Se obtendrán unas curvas parecidas a las de la Figura 67.

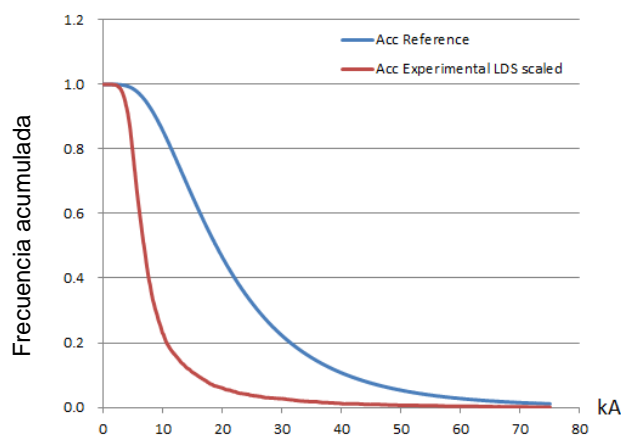


Figura 67. Ejemplo de curvas experimental y de referencia preparadas para ajustar.

En este punto, se juega con los valores de las celdas anteriores para escalar y superponer las curvas de referencia y experimental, teniendo en cuenta:

- 1) Escalar y desplazar para solapar la parte lineal de ambas curvas (especialmente entre 15 y 25 kA de la curva de referencia).
- 2) Escalar y desplazar para superponer la curvatura a 30 kA. Significa que ambas curvas coincidirán en el rango de 25 kA a 80 kA.

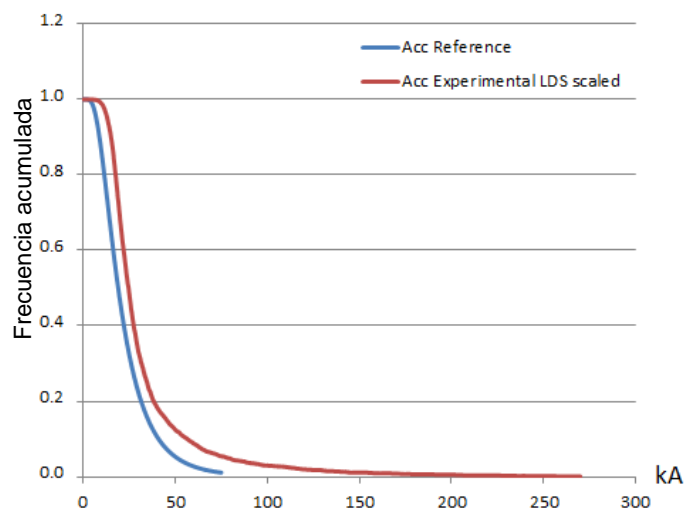
Primero intentar hacer coincidir las curvas cambiando el valor de multiplicación (G2). Esto funcionará si la curva experimental y la referencia tienen una relación lineal con sus valores estadísticos. El valor multiplicador (G2) puede ser menor y mayor que 1.

Si al ajustar el factor de multiplicación (G2) las curvas no coinciden, se establecen nuevamente los valores de escala iniciales. Entonces se aconseja escalar los ejes horizontales (celda D2). Así se ajusta la pendiente de la curva LDS experimental.

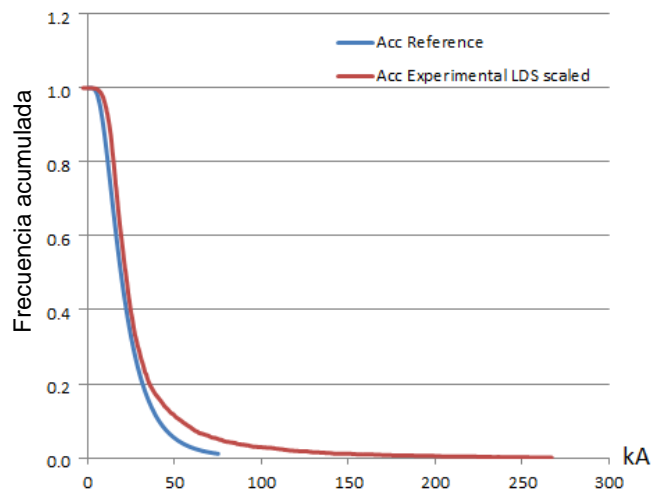
En el ejemplo anterior, con un valor de 3.3 en la celda D2 se obtiene la Figura 68a. Seguidamente, agregando un desplazamiento horizontal de -2.8 en la celda D3, se obtiene la Figura 68b. Finalmente, un ligero desplazamiento vertical de -0.04 en la celda H2 dará el resultado de la Figura 68c. Nótese como ambas curvas concuerdan en la parte lineal (15 kA a 25 kA) y en el segmento de curvatura (25 kA a 50 kA).

Nota: Ajustar las curvas teniendo en cuenta justar lo más posible la parte lineal y manteniendo el mínimo error en la curvatura. En el caso de *strokes*, el error en la curvatura puede ser a veces mayor, pero hay que elegir el ajuste que lo minimice y que maximice la pendiente lineal.

a)



b)



c)

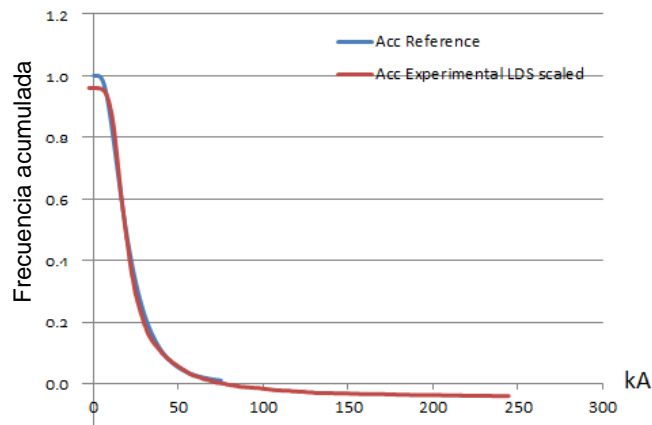


Figura 68. Ajuste de curvas.

7. Obtener la eficiencia de detección para flashes y strokes.

La eficiencia viene dada directamente por el valor de eficiencia alcanzado por la parte superior de la curva experimental. Con la hoja de cálculo, simplemente seleccionar este valor.

En el ejemplo de la Figura 69, la DE es 0.96.

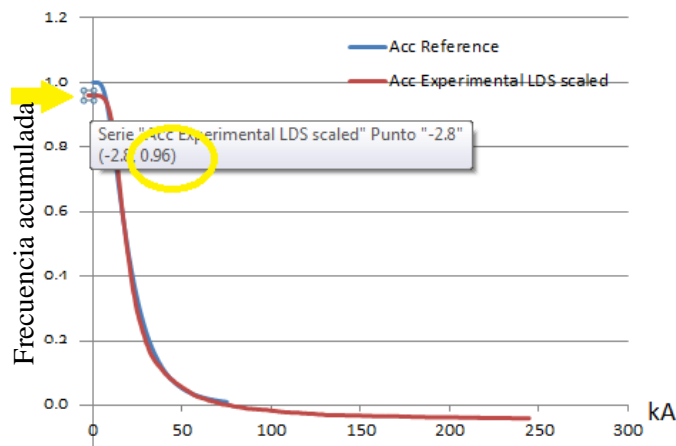


Figura 69. Ejemplo de encontrar la DE a partir del gráfico.

De este modo se obtiene la DE de *flash* y la de *stroke*.

8. Comprobación de la DE.

Se ha de comprobar que la DE de flash es mayor que la DE de stroke:

$$DE_{flash} > DE_{stroke}$$

Si no se cumple, el método no es válido. Si es el caso, comprobar de nuevo si la distribución es normal, siguiendo el paso 3.