

Estudio Preliminar de la Afectación por Rayos a Estructuras de Aerogeneradores a Ser Instalados
en Colombia

Miguel Angel Vera Granados

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Electricista

Director

Édison Andrés Soto Ríos

PhD En Ingeniería

Co-director

Brandon Steven Ardila Murillo

Ing Electricista

Universidad Industrial de Santander

Faculta de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2022

Dedicatoria

Esta tesis se la dedico a mi querida esposa, me acompañaste durante todo este proceso y fuiste mi mayor motivación para no rendirme, siempre creíste en mí y estuviste presente para darme apoyo en los momentos más difíciles, gracias por todo tu amor y comprensión

Agradecimientos

A la universidad industrial de Santander, por permitir la culminación de esta meta, como miembro de esta importante institución.

A mis directores de trabajo de grado por su acompañamiento y apoyo incondicional en el desarrollo del proyecto y a todos sus consejos y recomendaciones.

A mi familia por su apoyo incondicional y estar siempre motivándome.

Contenido

INTRODUCCIÓN	15
1. ANTECEDENTES	17
2. MARCO TEORICO.....	22
2.1. Mecanismos de formación y propagación de Rayos	22
2.1.1. Iniciación de los Rayos	22
2.1.2. Formación de Pasos	23
2.1.3. Campo eléctrico y campo magnético	25
2.1.4. Campo electrostático	26
2.1.5. Campo magnético.....	27
2.1.6. Etapas posteriores al líder escalonado	27
2.2. Interacción de rayos con Estructuras Elevadas	28
2.2.1. Rayos descendentes y ascendentes (inducidos y autoiniciados).....	28
2.3. Daños a los Aerogeneradores.....	30
2.3.1. Arcos eléctricos	30
2.3.2. Ondas de choque	31
2.3.3. Conducción de la corriente	31
2.3.4. Efectos indirectos	31
2.4. Análisis de Riesgo.....	31
2.4.1. Densidad de rayos (Ng)	32
2.4.2. Área colectora	32
2.4.3. Factor localización	33
2.5. Funcionamiento de la red LMA	33
2.5.1. La línea base.....	33
2.5.2. La distribución de los sensores	34
2.5.3. Los sitios idóneos para la ubicación de las estaciones	34
2.6. Red Colombiana de detección total de rayos con tecnología LINET	37
2.7. Protección de aerogeneradores	38
2.7.1. Límite entre zonas	40
2.7.2. Protección para las Palas	41
2.7.3. Góndola.....	42

2.7.4. Buje.....	43
2.7.5. Torre	43
2.7.6. Tren de transmisión mecánico y sistema de orientación	43
2.7.7. Sistema eléctrico de baja tensión y sistemas electrónicos	44
2.7.8. Sistemas eléctricos de potencia de alta tensión.....	44
2.7.9. Puesta a tierra del aerogenerador	45
2.7.10. Otros métodos de protección.....	45
2.7.10.1. Protección del soporte principal.....	45
2.7.10.2. Resistencia de amortiguación.	46
2.7.10.3. Geometría de la puesta a tierra.....	46
2.7.10.4. Back Flow..	47
2.7.10.5. Protección del circuito de control.	48
3. METODOLOGIA	49
3.1. Zona de estudio	49
3.2. Estructuras de estudio.....	49
3.3. Análisis de la interacción de rayos con estructuras elevadas.....	50
3.4. Análisis de riesgo	51
4. RESULTADOS.....	55
4.1. Estructuras de estudio.....	55
4.2. Interacción	57
4.2.1. Alturas de iniciación.....	57
4.2.2. Distancia al origen, fuente más baja y corriente.	57
4.2.2.1. Eventos CG-.....	57
4.2.2.2. Eventos CG+	74
4.3. Análisis de riesgo y comparación de las normas	83
5. CONCLUSIONES	88
Referencias Bibliográficas	90

Lista de figuras

Figura 1. Efecto de rotación y rayos ascendentes iniciados desde el aerogenerador. Tomadas de (Joan Montanyà et al., 2014).....	18
Figura 2. Relación de los giros oceánicos y los rayos de invierno. Tomadas de (Joan Montanyà et al., 2016).	19
Figura 3. Evolución de la estructura vertical de tormenta. Tomada de (Pineda et al., 2018).....	21
<i>Figura 4. Perfil vertical de las estructuras de carga, tomadas de (Pineda et al., 2018)</i>	<i>21</i>
Figura 5. Modelo de iniciación de rayos descrito por Griffiths y Phelps.	23
Figura 6. Desarrollo del líder escalonado negativo, basada en la descripción dada por Gorin et al. (1976). Adaptada de (Griffiths & Phelps, 1976).....	24
Figura 7. Geometría usada para calcular campo eléctrico y campo magnético desde un punto P. adaptado de (Rakov & Uman, 2003).	25
Figura 8. Mecanismo de formación de rayos descendentes y ascendentes inducidos por otro rayo o auto iniciado por la estructura elevada.....	29
Figura 9. Esquema del área colectora de rayos para el caso puntual de un aerogenerador.	32
Figura 10. Ubicación de las estaciones de la red LMA en la zona de Barrancabermeja y sus alrededores. Tomado y modificado de QGIS	34
Figura 11. Esquema general del funcionamiento del sistema LMA para 6 estaciones. Modificada de The New Mexico Tech 3D Lightning Mapping Array. W. Rison, R.J. Thomas, P.R. Krehbiel. (1999)......	35
Figura 12. Ubicación de los sensores de la Red de localización de Rayos LINET.	38
Figura 13. División de las zonas de afectación por rayos de un aerogenerador.	39
Figura 14. Medidas de protección, tomadas de IEC21400:24.	41

Figura 15. Geometría de las palas de un aerogenerador.	42
Figura 16. Esquema de protección para la góndola de un aerogenerador.	43
Figura 17. Gráficas del comportamiento de los descargadores y contactos deslizantes usados como protección del soporte principal del aerogenerador, tomado de (Goud et al., 2016)	46
Figura 18. Tensiones de paso a 0.5, 0.8, 1.0, 1.2 y 1.5 m de profundidad. Tomado de (Ukar & Zamora, 2011).....	47
Figura 19. Sobretensión en el lado de alta tensión del transformador elevador. Tomado de (Nguyen et al., 2017)	48
Figura 20. Sobretensión transitoria de tierras individuales e interconectadas, tomada de (Jiang et al., 2013)	48
Figura 21. Vista principal LMA Zoom Viewer.	50
Figura 22. Gráfico Tiempo-Distancia LMA Zoom Viewer.....	51
Figura 23. Capturas de pantalla de Google Earth utilizando la herramienta de marcación para calcular la altura.	55
Figura 24. Estructuras de estudio dentro del área de influencia de la Red LMA	56
Figura 25. Cantidad de los eventos CG que impactaron es las estructuras de estudio Vs Alturas de origen.....	57
Figura 26. Mapeo evento A CG-.....	58
Figura 27. Evento A CG-, relación tiempo y distancia de las fuentes	59
Figura 28. Mapeo evento B CG-.....	60
Figura 29. Evento B CG-, relación tiempo y distancia de las fuentes	60
Figura 30. Mapeo evento C CG-.....	62
Figura 31. Evento C CG-, relación tiempo y distancia de las fuentes	62

Figura 32. Mapeo evento D CG-.....	64
Figura 33. Evento D CG-, relación tiempo y distancia de las fuentes	64
Figura 34. Mapeo evento E CG-.....	66
Figura 35. Evento E CG-, relación tiempo y distancia de las fuentes	66
Figura 36. Mapeo evento F CG-	68
Figura 37. Evento F CG-, relación tiempo y distancia de las fuentes.....	68
Figura 38. Mapeo evento G CG-.....	70
Figura 39. Evento G CG-, relación tiempo y distancia de las fuentes	70
Figura 40. Mapeo evento H CG-.....	71
Figura 41. Evento H CG-, relación tiempo y distancia de las fuentes	72
Figura 42. Histograma de distancia horizontal del líder a su origen	73
Figura 43. Mapeo evento A CG+.....	74
Figura 44. Evento A CG+, relación tiempo y distancia de las fuentes	75
Figura 45. Mapeo evento B CG+.....	76
Figura 46. Evento B CG+, relación tiempo y distancia de las fuentes	76
Figura 47. Mapeo evento C CG+.....	77
Figura 48. Evento C CG+, relación tiempo y distancia de las fuentes	78
Figura 49. Mapeo evento D CG+.....	79
Figura 50. Evento D CG+, relación tiempo y distancia de las fuentes	79
Figura 51. Mapeo evento E CG+	81
Figura 52. Evento E CG+, relación tiempo y distancia de las fuentes.....	81
Figura 53. Medición del perfil de elevación.	84

Figura 54. Mapa de la densidad de descargas a tierra del departamento de Santander, tomada de (Ardila Murillo et al., 2022).....	85
Figura 55. Numero de eventos usando las diversas fórmulas propuestas por las normas IEC-62305 (DDT=25), NTC-4552 (DDT=9.359) e IEC61400-24.	86
Figura 56. Comparación de impactos reales y teóricos respecto al área de captación de las estructuras agrupadas.....	88

Lista de Tablas

Tabla 1. Índice de actividad de rayos ascendentes	30
Tabla 2. Ubicación de los sensores de la Red LINET.	37
Tabla 3. Descripción de las zonas de afectación por rayos en un aerogenerador. Según IEC 62305-1. Adaptado de IEC61400:24:2019	40
Tabla 4. Factor de localización para las normas NTC-4552 e IEC-62305	53
Tabla 5. Valores para el factor de localización según las características del terreno.	54
Tabla 6. Tipos de estructuras y cantidad de flashes.....	56
Tabla 7. Lista de los eventos GC- a las estructuras seleccionadas junto con sus principales atributos.....	58
Tabla 8. Valores estadísticos para los eventos GC-.....	73
Tabla 9. Lista de los eventos GC+ a las estructuras seleccionadas junto con sus principales atributos.....	74
Tabla 10. Valores estadísticos para los eventos GC+.....	83
Tabla 11. Cálculo de alturas y áreas de captación de las estructuras objeto de estudio.	83
Tabla 12. Comparación de los datos de impactos reales (diciembre 2018 a noviembre 2019) a las estructuras agrupadas por área colectora con respecto a los valores obtenidos aplicando las fórmulas propias de las normas IEC-62305, NTC-4552, IEC61400-24 y ERIKSSON.	87

RESUMEN

Título: Estudio Preliminar de la Afectación por Rayos a Estructuras de Aerogeneradores a Ser Instalados en Colombia*

Autor: Miguel Angel Vera Granados**

Palabras clave: Rayos, Densidad de descargas a tierra (DDT), Nivel cerámico (NC), Estructuras, Análisis, Coordenadas geográficas, sitios específicos, Descargas atmosféricas.

Descripción:

El presente trabajo de investigación parte de estudiar la interacción de rayos con estructuras elevadas (EE) presentes en el área de influencia de la Red Dabeiba LMA ubicada en Barrancabermeja Santander, para luego hacer una inferencia en cuanto a la protección contra rayos en aerogeneradores a ser instalados en zonas tropicales. Dicho estudio inicia con la identificación y ubicación de más de 600 EE usando Google Earth y Qgis. Utilizando datos de descargas nube-tierra (CG) suministrados por la red LINET, se encontraron los rayos (strokes) que impactaron a dichas estructuras, con lo cual se seleccionaron las 42 EE con mayor cantidad de impactos, siendo estas: 20 torres de transmisión, 3 antenas de telecomunicaciones y 19 edificios. Para cada rayo que interactuó con alguna EE se realizó un análisis de las fuentes mapeadas por la red LMA, determinando alturas de iniciación y de propagación, polaridad y naturaleza descendente o ascendente de los líderes que causaron impactos en EE. Finalmente, con ayuda de la herramienta Google Earth se estimó la altura de estas estructuras para llevar a cabo un análisis de riesgo, para lo cual utilizando los estándares IEC61400:24, IEC62305 y la norma NTC4552 se obtuvo el número de eventos peligrosos. A continuación, los datos obtenidos se contrastaron con los impactos registrados por la Red LINET y como conclusión se encontró

que los impactos reales son aproximadamente 3 veces más que los calculados, situación que demuestra una clara necesidad de replantear y reformular las normas actuales ya que los eventos calculados no se acercan a la realidad. Así mismo los aerogeneradores poseen características que incrementan la probabilidad de generar o recibir impactos y por esto es necesario implementar medidas adicionales a las sugeridas por el estándar IEC61400:24 que ayuden a mitigar los efectos del rayo.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de telecomunicaciones. Director Édison Andrés Soto Ríos. Codirector Brandon Steven Ardila Murillo

ABSTRACT

Title: Preliminary study of the effects of lightning on the structures of wind turbines to be installed in Colombia.

Autor: Miguel Angel Vera Granados**

Key Words: Lightnings, ground discharges density [GFD], keraunic level [KL], structures, analysis, geographical coordinates, specific sites, atmospheric Discharges.

Description:

This research is based on studying lightning interaction with elevated structures (ES) present in the influence area of the Dabeiba LMA Network located in Barrancabermeja Santander, then making an inference regarding lightning protection in wind turbines to be installed in tropical zones. The study begins with identifying and locating more than 600 ES using Google Earth and Qgis. The lightning strokes that impacted these structures were found using data from cloud-to-ground lightning activity (CG) provided by the LINET network. The 42 EEs with the greatest number of strokes were selected as follows: 20 transmission towers, three telecommunications antennas, and 19 buildings. For each lightning strike that interacted with an EE, an analysis of the sources mapped by the LMA network was performed, determining initiation and propagation heights, polarity, and descending or ascending nature of the leaders that caused impacts on the EE. Finally, with the help of the Using the Google Earth tool, the height of these structures was estimated to carry out a risk analysis, for which the number of dangerous events was obtained using the IEC61400:24, IEC62305, and the NTC4552 standards. Next, the data obtained was contrasted with the impacts registered by the LINET network. In conclusion, it was found that the real impacts are approximately three times more than those calculated, demonstrating a clear

need to rethink and reformulate the current regulations since the calculated events do not come close to reality. Likewise, wind turbines have characteristics that increase the probability of generating or receiving impacts. For this reason, it is necessary to implement additional measures to those suggested by the IEC61400:24 standard that helps mitigate the effects of lightning.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de telecomunicaciones. Director Édison Andrés Soto Ríos. Codirector Brandon Steven Ardila Murillo

INTRODUCCIÓN

Actualmente, debido a la creciente demanda de energía, las naciones han explorado diversas formas de hacer sostenible el uso de sus recursos, para lo cual se han estudiado las diferentes opciones de generación de energías limpias o renovables entre las cuales se destaca la energía eólica. Dicho tipo de energía ha presentado un importante crecimiento a nivel mundial correspondiente a un 19% en relación con el 2018, esto es, una instalación en 2019 de 60.4GW según GWEC en GLOBAL WIND REPORT. En Colombia, con el fin de cumplir la Ley 1715 de 2014 (Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional) se ha incentivado la implementación de fuentes de energías renovables. Según el Informe de Registro de Proyectos de Generación (corte a julio 31 de 2020) de la UPME, se encontraban vigentes 17 proyectos de energía eólica con una capacidad total de 2250 MW.

El crecimiento del interés por la energía eólica ha impulsado el estudio y la implementación de nuevas tecnologías en la producción de la misma, como es el caso de la instalación de aerogeneradores como el Haliade-X de 12MW que cuentan con una altura total de 260 metros. La gran altura de los aerogeneradores sumada a la alta actividad de rayos en Colombia (debido a la ubicación geográfica del país en la zona de convergencia intertropical en la cual hay regiones como el Catatumbo que cuentan con una densidad de descargas a tierra de hasta 53 flashes por kilómetro cuadrado al año (López et al., 2016)), hace que estos sean más propensos a recibir impactos de rayo (March, 2018) y los convierte en focos de descargas a tierra o hotspots (Joan Montanyà et al., 2014).

Otros factores que influyen en la tendencia que tienen los aerogeneradores de recibir impactos de rayo son la complejidad del terreno, la altura sobre el nivel del mar, la densidad de

descargas a tierra y la actividad de rayos en invierno (March, 2018). Adicionalmente, mecanismos propios como lo es la rotación, evitan la acumulación de carga espacial producida por el efecto corona e incrementa la exposición a campos eléctricos más fuertes, por lo que aumenta la posibilidad de que estos elementos inicien líderes ascendentes que al alcanzar la base de alguna nube de tormenta causan descargas CG. Los aerogeneradores también poseen un área de captación mayor a estructuras fija de similar altura, aumentando la posibilidad de recibir impactos CG (Joan Montanyà et al., 2014). De acuerdo con estas premisas se infiere que la construcción de parques eólicos provoca un aumento en la actividad local de rayos, por ejemplo, se han realizado análisis de 50 parques eólicos y 74 aerogeneradores respectivamente, 5 y 10 años antes y 5 años después de su construcción, la frecuencia aumento en el primer caso un 64.1% para rayos negativos y 28.7% para rayos positivos; en el segundo se vio un incremento de 1.41 para la totalidad de los eventos de rayo (Diendorfer et al., 2014; Soula et al., 2019).

Las tormentas de invierno implican un riesgo de seguridad a los aerogeneradores. Según (March et al., 2016) en Japón, el 99% de los impactos a aerogeneradores provienen de rayos de invierno. Estas tormentas se caracterizan por una actividad repetitiva de rayos ascendentes en periodos cortos de tiempo y grandes transferencias de carga. Pueden durar hasta 1 hora, aunque no resulte en un rayo completo, se genera una fatiga en las propiedades dieléctricas del aspa y necesitan ser consideradas en los estándares de protección (Joan Montanyà et al., 2016).

Teniendo en cuenta las características de los aerogeneradores y las condiciones climáticas de Colombia que se caracterizan por la gran densidad de rayos crea la necesidad de realizar estudios propios de afectación por rayos a estructuras de aerogeneradores. Así mismo, las consecuencias provocadas por los impactos indirectos o directos de los rayos sobre los aerogeneradores pueden incluir desde la afectación por daños en sus palas o en sus componentes

internos, provocar sobretensiones, tensiones inducidas o incluso la iniciación de líderes ascendentes desde las palas del aerogenerador. Estos antecedentes suponen un riesgo futuro sobre los aerogeneradores que serán instalados en Colombia y por tanto este trabajo repercute en la protección de aerogeneradores a ser instalados en zonas tropicales dado que hasta el momento no se ha estudiado su interacción con rayos usando redes LMA y tampoco se ha relacionado la cantidad de impactos en estructuras elevadas mediante redes de detección total de rayos como LINET.

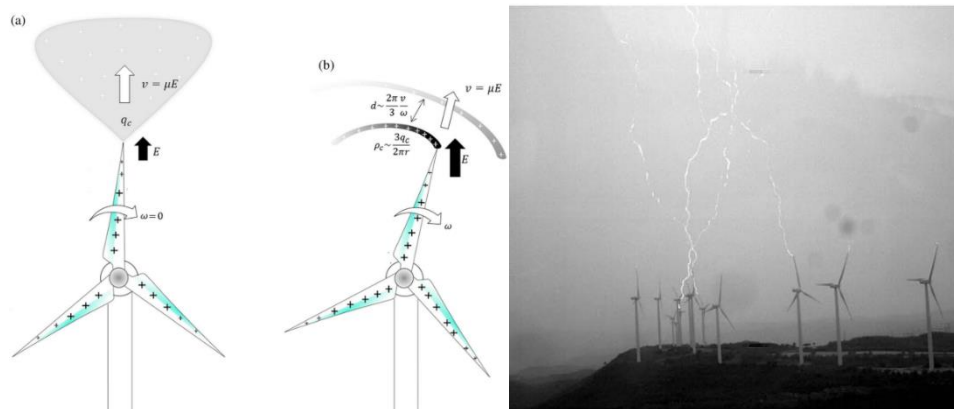
Por lo anterior, en este trabajo se hace una recopilación de las técnicas de protección a aerogeneradores nombradas en el estándar IEC 61:400-24, incluyendo métodos adicionales que pueden ayudar a mitigar los efectos generados por impactos de rayos. Así mismo se estudia la interacción de rayos con estructuras elevadas en el área de influencia de la Red LMA a través de la caracterización de líderes en cuanto a su altura de iniciación y de propagación, polaridad y longitud. Con el fin de analizar el comportamiento real de las descargas de rayo se utilizaron los datos suministrados por la Red LINET y la Red LMA, con estos se identificaron las estructuras más impactadas en el área de influencia de la Red LMA y en base a esto se realizó una comparación con las probabilidades teóricas calculadas a partir de las normas internacionales IEC 62305, IEC 61400:24 y la norma nacional NTC 4552.

1. ANTECEDENTES

Fueron tomados las investigaciones que tienen como objeto de estudio las descargas eléctricas atmosféricas, sus aspectos más relevantes y las posibles consecuencias en aerogeneradores. En (Joan Montanyà et al., 2014) el ELMA (Ebro 3-D Lightning Mapping Array) detectó de fuentes emergentes desde baja altitud en intervalos regulares de 3.15s, estas detecciones consisten en múltiples fuentes y duraron aproximadamente 100ms. Lo interesante es

que las detecciones de las fuentes coinciden con la ubicación de aerogeneradores en la cima de colinas y la cadencia de detección corresponde al tiempo que transcurre cada vez que una de las palas alcanza su punto más alto (90°) (**Figura 1.b**). Comprobando así que el mecanismo de rotación en sus palas contribuye a la generación de líderes, ya que en objetos elevados con conexión a tierra el campo eléctrico local puede alcanzar niveles muy altos en los cuales se desarrollan coronas eléctricas positivas, estas generan una carga espacial (**figura 1.a**) que suprime el campo eléctrico alrededor del objeto, la carga espacial está compuesta de iones positivos, y en el caso de aerogeneradores la velocidad radial del aspa es superior a la de los iones, de esta forma evita la acumulación de carga y están expuestos a campos eléctricos más fuertes (**Figura 1.a**). Dichos eventos ocurrieron varias veces, uno de los casos duro más de 1 hora.

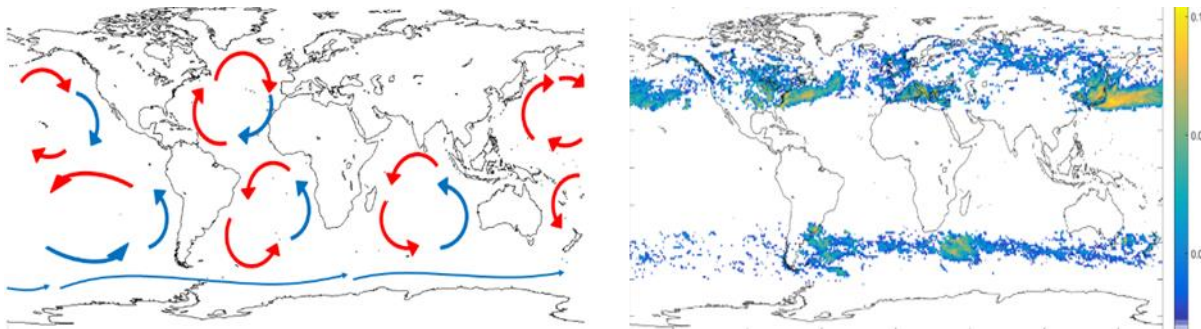
Figura 1. Efecto de rotación y rayos ascendentes iniciados desde el aerogenerador. Tomadas de (Joan Montanyà et al., 2014)



Adicionalmente la potencia radiada medida por el ELMA fue muy baja -5 dBW (rango normal 0-40 dBW), es decir, estas descargas tenían una corriente muy baja y no produjeron descargas de retorno.

Así mismo (Joan Montanyà et al., 2016) estudiaron la distribución global de rayos de invierno, para esto se utilizaron como criterio temperaturas iguales o inferiores a -10°C a aproximadamente 700hPa (~ 3 km de altura), los mapas obtenidos muestran que la mayor parte de estas tormentas están distribuidas en áreas oceánicas (Figura 2.b) y tienen relación con los giros oceánicos, esto es gracias a los gradientes de temperatura que se presenta cuando las masas de aire frío provenientes de los polos se encuentran con las aguas cálidas que provienen de la región ecuatorial de los giros de las corriente oceánicas (Figura 2.a); estas tormentas posean una baja actividad en comparación con las tormentas de temporada cálida y los rayos se caracterizar por ser altamente energéticos.

Figura 2. Relación de los giros oceánicos y los rayos de invierno. Tomadas de (Joan Montanyà et al., 2016).

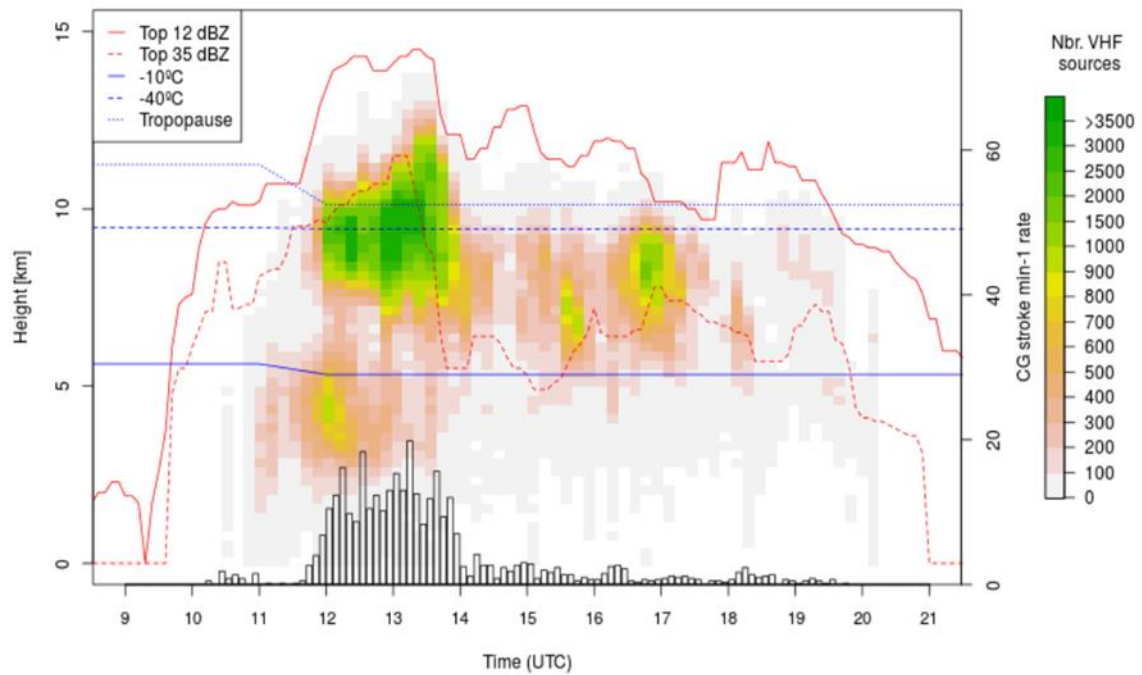


La actividad de rayos de invierno y la implicación que tiene en aerogeneradores fue estudiada en (March et al., 2016) en donde utilizaron como criterio de condiciones de tormenta eléctrica de invierno una temperatura igual o menor a 5°C y una presión de 900 hPa (~ 1 km msnm), tomaron como referencia el caso Japonés y definieron unos rangos para la clasificación de la actividad rayos de invierno (días de tormenta), sin actividad (0 a 4 días), actividad baja (5 a 10 días), actividad media (11 a 20 días) y actividad severa (21 o más días); esta clasificación es de suma importancia para realizar el análisis de riesgo ya que la densidad de descargas suministrada por los sistemas de localización de rayos son básicamente descargas descendentes,

de igual forma es importante considerar que los rayos de invierno pueden generar funcionamiento anormal del sistema de protección contra rayos.

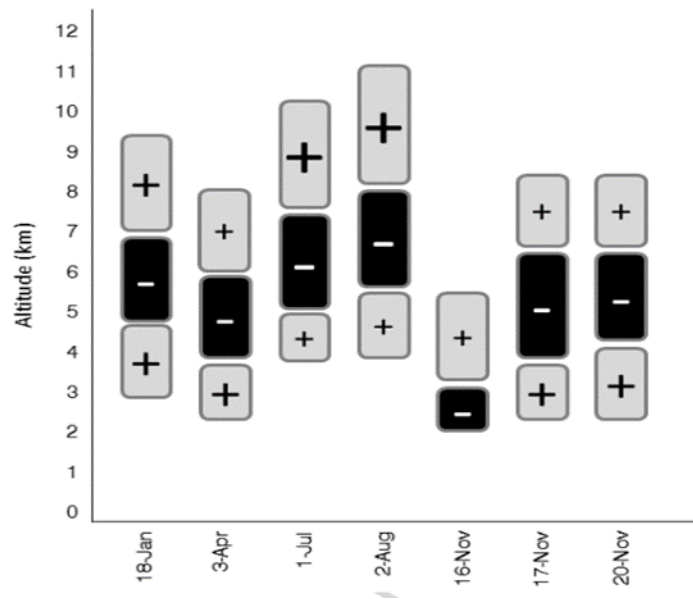
En (J. Montanyà et al., 2016) estudiaron las condiciones en la que se producen impacto de rayo a aerogeneradores, con ayuda del el ELMA, la red de detección de rayos LINET e información suministrada por el radar LA MIRANDA del servicio meteorológico de Cataluña, observaron que los lideres se generaban en los núcleos convectivos con reflectividades entre 35-45 dBz, también encontraron actividad en el LMA cuando la reflectividad del radar era mayor a 12 dBz por encima de la isoterma de -40°C (~ 8 km) y que una reflectividad mayor a 35 dBz por encima de la isoterma de -20°C indicaba que se contaban con las condiciones suficientes para el proceso de electrificación. Mas adelante en (Pineda et al., 2018) corroboraron que el proceso de carga sucede cuando se tienen ecos de radar de 30-40 dBz o más por encima de la isoterma de -10°C (Figura 3), también encontraron que las detecciones del LMA se limitan a periodos en los cuales los ecos de radar de 12 dBz están por encima de esta misma isoterma y que la densidad de fuentes VHF muestra una relación cercana con la altura de la señal de 35dBz. Además de esto obtuvieron los perfiles verticales de las estructuras de carga de los periodos en los cuales ocurrieron impactos a aerogeneradores (Figura 4)

Figura 3. Evolución de la estructura vertical de tormenta. Tomada de (Pineda et al., 2018)



los colores indican la densidad de fuentes LMA, la línea punteada indica los ecos del radar meteorológico.

Figura 4. Perfil vertical de las estructuras de carga, tomadas de (Pineda et al., 2018)



En (López et al., 2016) analizaron la primer información obtenida de la Red COLMA, concluyendo que en Colombia la mayoría de lideres se presentan entre los 3 y 15 km de altura, su altura promedio de origen es 10 km y esto es 2 km más en comparación a los datos obtenidos por ELMA en España, las tormentas tropicales tienen un desarrollo vertical mayor donde los lideres pueden alcanzar hasta 18 km de altura y los centros de cargas se encuentran a 5, 7.5 y 10 km (positivo-negativo-positivo).

2. MARCO TEORICO

2.1. Mecanismos de formación y propagación de Rayos

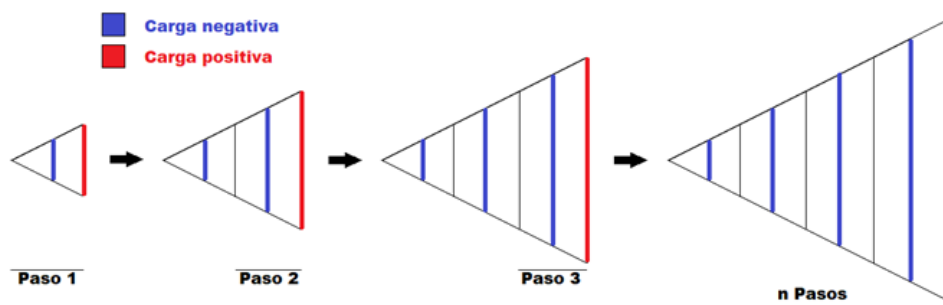
2.1.1. *Iniciación de los Rayos*

(Griffiths & Phelps, 1976) consideran que los rayos se forman a partir de un sistema inicial de streamers positivos que se van desarrollando desde un punto de un hidrometeoro el cual se encuentra excedido en su valor de activación de corona (2.5 a 9.5×10^5 V/m). Estos streamers forman un volumen cónico que crece longitudinalmente. Por su parte el campo eléctrico E_0 para la propagación de streamer de corona es de 1.5×10^5 V/m a 6.5 Km de altura y 2.5×10^5 V/m a 3.5 Km de altura, se asume que la carga positiva del sistema es distribuida uniformemente en un disco circular que constituye la base del cono, la carga negativa depositada es localizada en una serie de discos, cada uno cargado uniformemente que se encuentran entre la mitad entre el punto final y el punto inicial de cada paso (Figura 5). Se forma un dipolo cónico que puede aumentar el campo eléctrico existente en la punta del cono, lo que conlleva a la generación de varios sistemas cónicos de streamers secuencialmente, los cuales se desarrollan a media que cada uno pasa por los restos del anterior. La presencia de series de 3 a 7 de estos sistemas aumentan el campo eléctrico a 1.5×10^6 V/m, en una distancia de pocos metros, lo que

es suficiente para aumentar el campo eléctrico requerido para el rompimiento dieléctrico, lo que podría eventualmente generar un líder escalonado.

Este modelo es complementado por Gurevich et al. (1997) quien determina que la fuga de electrones desempeña un papel importante en la iniciación del rayo. Es decir, cuando el electrón gana más energía por parte del campo eléctrico entre la colisión con las partículas de aire en comparación con la pérdida de energía durante la colisión.

Figura 5. Modelo de iniciación de rayos descrito por Griffiths y Phelps.



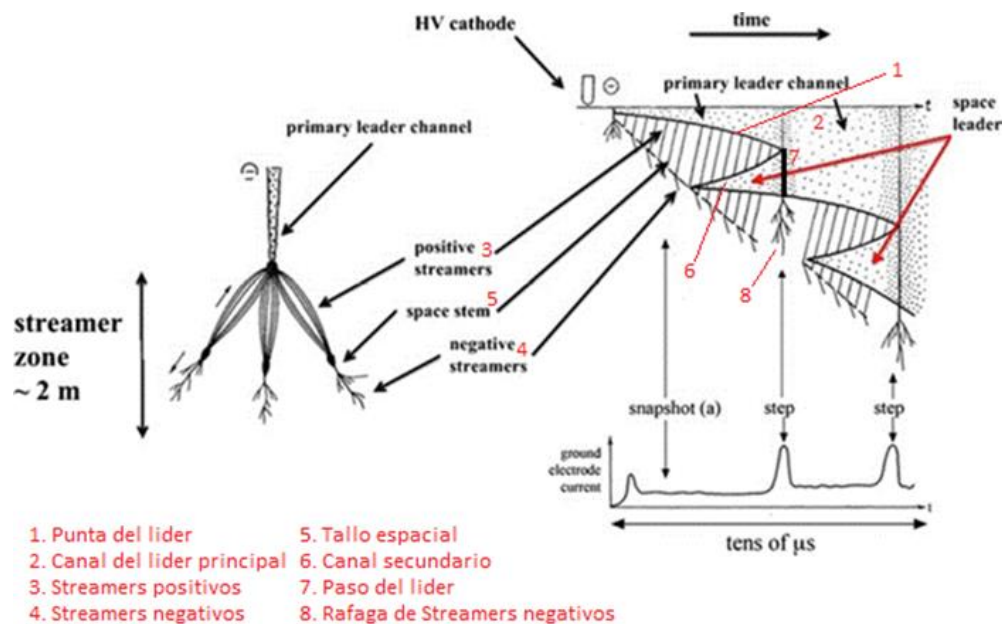
2.1.2. Formación de Pasos

A partir de ensayos de líderes generados en laboratorio ha sido posible determinar el siguiente modelo de (Rakov & Uman, 2003) para líderes escalonados negativos. En primer lugar se genera el impulso inicial de corona desde el electrodo de alto voltaje produciendo el sistema ramificado de streamers, que calientan el aire cerca al electrodo y forman la sección inicial del canal de plasma del líder, esto produce el primer impulso de corriente.

La sección inicial del canal del líder (Fig. 6 etiquetado como 2) se extiende en el espacio frente al electrodo, la punta del líder (Fig. 6 etiquetado como 1) es más brillante que el canal detrás de esta, al frente de la punta del líder se encuentra la zona de streamers, en el caso del líder negativo este compuesto por streamer positivos y negativos (Fig. 6 etiquetados como 3 y 4), los positivos se desarrollan hacia la punta del líder y los negativos se desarrollan en dirección

contraria. Tanto streamers positivos y negativos parecen iniciar a partir de la formación de plasma, denominado tallo espacial (Fig. 6 etiquetado como 5), que se mueve hacia el espacio en frente de la punta del líder, cuando el tallo espacial se calienta lo suficiente da lugar a una sección del canal del líder que no está conectado a al electrodo y se extiende en ambas direcciones (canal bidireccional) según Bazelyan et al (1978) es un segundo canal (Fig. 6 etiquetado como 6). La parte que tiene cargas positivas se extiende hacia arriba, la que tiene cargas negativas se extiende hacia abajo.

Figura 6. Desarrollo del líder escalonado negativo, basada en la descripción dada por Gorin et al. (1976). Adaptada de (Griffiths & Phelps, 1976)



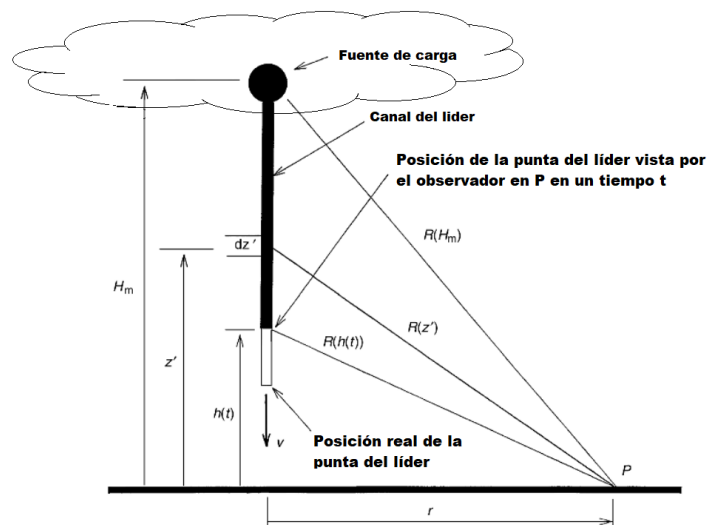
El primer paso del líder (Fig. 6 etiquetado como 7) es formado cuando el extremo positivo del segundo canal hace contacto con el líder principal, en ese momento el alto nivel de potencial del canal principal es transferido rápidamente al extremo inferior del segundo canal, como resultado se produce una ráfaga streamers negativos (Fig. 6 etiquetado como 8) que se producen en la nueva sección añadida al canal. Esta ruptura genera pulsos de corriente que se

propagan hacia el electrodo de alto voltaje, iluminando brevemente la totalidad del canal. La formación del siguiente paso inicia con la formación de un nuevo tallo espacial. Así en el líder negativo, la ocurrencia de cada paso luminoso es causada por la conexión del canal secundario al canal principal.

2.1.3. Campo eléctrico y campo magnético

Para simplificar el estudio del campo eléctrico y magnético producido por el líder escalonado, se puede suponer que el líder crea un canal que se extiende verticalmente hacia el suelo con una velocidad constante V desde una fuente de carga estacionaria y esféricamente simétrica a altura H_m , el suelo se asume como conductor perfecto (Figura 7) (Rakov & Uman, 2003)

Figura 7. Geometría usada para calcular campo eléctrico y campo magnético desde un punto P . adaptado de (Rakov & Uman, 2003).



2.1.4. Campo electrostático

(Thottappillil & Rakov, 1997) encontraron una expresión para el campo eléctrico expresada por lo siguiente:

$$E_z(r, t) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \int_{h(t)}^{H_m} \frac{z'}{R^3(z')} \rho_l \left(z', t - \frac{R(z')}{C} \right) dz' - \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{H_m}{R^3(H_m)} \int_{h(t)}^{H_m} \rho_l \left(z', t - \frac{R(z')}{C} \right) dz' \quad (1)$$

Donde $R(H_m) = (H_m^2 + r^2)^{1/2}$ y $h(t)$ es la altura a la que el observador ve el extremo inferior del canal del líder, $h(t)$ es dada por:

$$t = \frac{H_m - h(t)}{V} + \frac{\sqrt{h^2(t) + r^2}}{C} \quad (2)$$

Si se asume que la diferencia máxima en el tiempo de propagación desde cualquier fuente en el canal al observador es menor que el tiempo requerido la ecuación se puede simplificar a:

$$E_z(r, t) = \frac{-1}{2\pi\epsilon_0} \int_{H_m}^{z_t} \left[\frac{z'}{R^3(z')} - \frac{H_m}{R^3(H_m)} \right] \rho_l(z', t) dz' \quad (3)$$

Donde $z_t = H_m - V * t$ es la altura de la punta del líder en cualquier tiempo t y V es la velocidad del líder que se asume como constante.

Thomson derivó una ecuación similar basada en la ley de Coulomb, asume una distribución de carga en el canal del líder constante ρ_l , lo que corresponde a un canal de líder cargado uniformemente, y la ecuación se puede reescribir como:

$$E_z(r, t) = \frac{\rho_l}{2\pi\epsilon_0 r} \left[\frac{1}{(1 + z_t^2/r^2)^{1/2}} - \frac{1}{(1 + H_m^2/r^2)^{1/2}} - \frac{(H_m - z_t)H_m}{r^2(1 + H_m^2/r^2)^{3/2}} \right] \quad (4)$$

Para un punto de campo donde $H_m \gg 2r$, y $z_t = 0$ o $z_t^2 \ll r^2$ y $z_t \ll H_m$

$$E_z(z_t = 0) = \frac{\rho_l}{2\pi\epsilon_0 r} \quad (5)$$

2.1.5. Campo magnético

La aproximación del campo magnético del líder generalmente se escribe en términos de a corriente $I(t)$, que se asume varía lentamente y es la misma para todas las alturas a lo largo del canal vertical del rayo.

Expresión para el campo magnético (Thottappillil & Rakov, 1997)

$$\beta_\Phi(r, t) = \frac{\mu_0}{2\pi r} \left[\frac{H_m}{r(H_m)} - \frac{Z_t}{R(Z_t)} \right] I(t) \quad (6)$$

$$Z_t = 0$$

$$\beta_\Phi(r, t) = \frac{\mu_0}{2\pi r} \left[\frac{H_m}{r(H_m)} \right] I(t) \quad (7)$$

Si $r \ll H_m$ el punto P está muy cerca de la base

$$\beta_\Phi(r, t) = \frac{\mu_0}{2\pi r} I(t) \quad (8)$$

2.1.6. Etapas posteriores al líder escalonado

Cuando el líder escalonado está cerca a tierra el campo eléctrico es tan alto que induce una concentración de cargas positivas en el suelo, especialmente en objetos elevados induciendo descargas eléctricas ascendentes, cuando una de estas descargas hace contacto con una de las ramificaciones del líder escalonado se genera el proceso de enlace, este determina el punto de impacto del rayo y se establece el canal principal de corriente entre nube y tierra, en este punto la carga acumulada en la punta del líder escalonado es transferida a tierra en un intervalo de tiempo tan pequeño que se genera un gran flujo de corriente eléctrica, este segmento del canal se

vuelve muy luminoso y altamente conductivo, este proceso es conocido como descarga de retorno, la descarga de retorno se propaga de forma continua por el canal y la carga eléctrica negativa que estaban en el líder escalonado descienden a tierra. Durante la descarga de retorno se producen 2 fenómenos que podemos observar a simple vista, uno de ellos es el canal completamente iluminado, este alcanza una temperatura de hasta 30000°C y produce una onda expansiva que conocemos como trueno. Cuando termina la descarga de retorno y en la porción superior del canal del rayo se cuenta con una carga negativa adicional se puede producir una descarga subsecuente, esto ocurre únicamente si no ha transcurrido más de 100ms desde que termino la descarga anterior produciendo un líder de propagación continúa conocido como líder dardo, este se mueve por el canal depositando nuevamente carga negativa a lo largo del canal generando las condiciones para una nueva descarga de retorno (States et al., n.d.)

2.2. Interacción de rayos con Estructuras Elevadas

La razón por la cual se lleva a cabo este estudio es precisamente por la alta frecuencia de interacción de las descargas eléctricas sobre las estructuras elevadas, en este caso los aerogeneradores. A continuación, se detallarán los fenómenos que aportan sustancialmente en que se produzca este proceso.

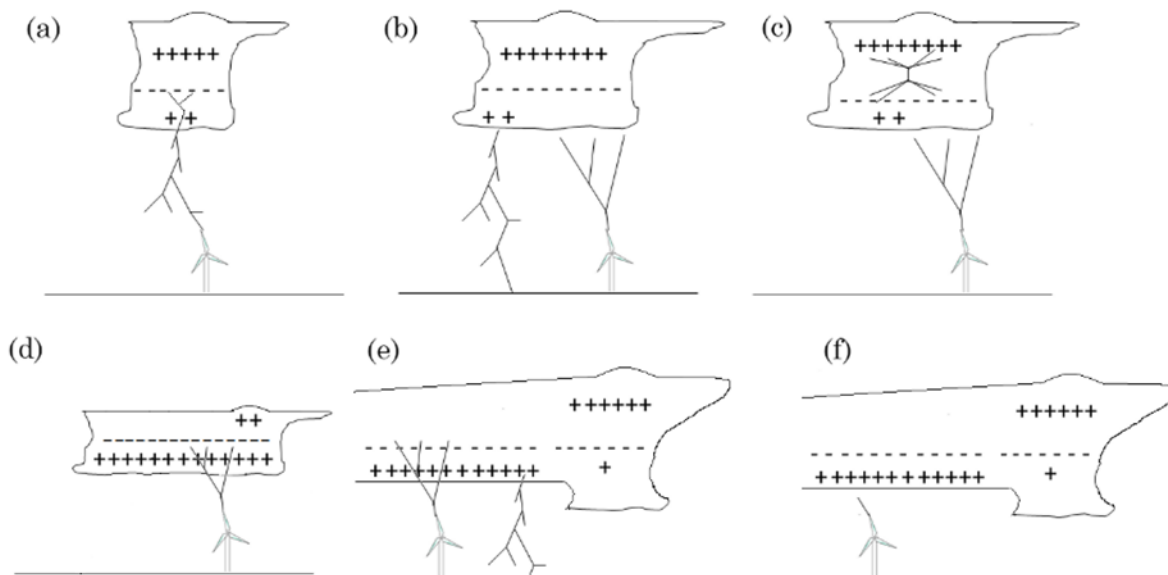
2.2.1. Rayos descendentes y ascendentes (inducidos y autoiniciados)

Los rayos descendentes son la amenaza más común debido a que es el tipo de rayo más frecuente y es una amenaza a los aerogeneradores Figura 8.a (Joan Montanyà et al., 2016).

Por su parte las estructuras por encima de 100m como los aerogeneradores también son propensas de iniciar rayos ascendentes. Existen 2 situaciones con respecto a la iniciación del líder ascendente desde el aerogenerador (UL): los rayos ascendentes inducidos por otro rayo

(LTUL) (Figura 8 (b), (c) y (e)) y rayos ascendentes auto iniciados (SIUL) (Figura 8 (d) y (f)). El rayo inducido se debe a la ocurrencia de otro flash que, aunque no llega a impactar sobre el aerogenerador, dicho flash (GC o IC) provee las condiciones para la iniciación del líder ascendente, los rayos inducidos se dan frecuentemente en tormentas cálidas que permiten grandes y rápidas neutralizaciones de carga. En el caso de los auto iniciados, las condiciones más favorables se presentan durante las tormentas de invierno que se caracterizan por la disminución de la altitud de nivel de congelación que dificulta la generación de rayos descendentes, sin embargo la presencia de objetos prominentes del suelo proveen condiciones favorables para iniciar lideres ascendentes (Joan Montanyà et al., 2014, 2016; Pineda et al., 2018).

Figura 8. Mecanismo de formación de rayos descendentes y ascendentes inducidos por otro rayo o auto iniciado por la estructura elevada.



El porcentaje de rayos ascendentes está influenciado por 4 factores: la altura del aerogenerador, la complejidad del terreno, la altura sobre el nivel del mar y la actividad de rayos de invierno siendo esta última la más importante, ya que sin actividad de tormentas eléctricas de

invierno incluso en la cima de una montaña el porcentaje máximo de rayos ascendentes es de 50%, en cambio con condiciones severas de tormentas eléctricas de invierno incluso a nivel del mar se puede llegar a porcentajes cercanos del 100% (March, 2018).

Tabla 1. Índice de actividad de rayos ascendentes

Nivel de actividad de rayos de invierno	Porcentaje de rayos ascendentes %
Alto	80 a 99
Medio	40 a 90
Bajo	20 a 50
Sin actividad	10 a 40

2.3. Daños a los Aerogeneradores

En objetos elevados conectados a tierra el campo eléctrico local puede alcanzar niveles tan altos que pueden desarrollarse coronas eléctricas positivas, esta condición favorece la producción de líderes positivos.

Las palas del aerogenerador son las partes más expuestas y experimentan el impacto total de los efectos del rayo, la ocurrencia de impacto directo aumenta hacia la punta de la pala y disminuye hacia la base de esta, según el estándar IEC61400:24-2019 los daños a las palas pueden clasificarse en cuatro niveles que son: evento menor (I), evento moderado (II), incidente serio (III), incidente catastrófico (IV). Los daños a los aerogeneradores pueden producirse por impactos directos o indirectos, en (Joan Montanyà, 2016) clasifican los mecanismos de daño del rayo de la siguiente manera:

2.3.1. Arcos eléctricos

Se produce por el contacto de alguno de los componentes del aerogenerador con el canal del rayo, ocasionando un derretimiento o vaporización del material.

2.3.2. Ondas de choque

Debido a que la energía es entregada en muy poco tiempo por la descarga de retorno, la presión del canal excede a la del aire que lo rodea, produciendo una expansión a velocidad supersónica generando la onda de choque.

2.3.3. Conducción de la corriente

En el aerogenerador hay varios caminos que pueden conducir la corriente, estos pueden experimentar fuerzas electrodinámicas y sobretensiones, la sobretensión se debe a las caídas de voltaje y al acoplamiento en las partes conductivas.

2.3.4. Efectos indirectos

Campos electromagnéticos de rayos cercanos o corrientes que ingresan por las líneas. Además del daño a las palas los impactos de rayo pueden afectar severamente el equipo de control y los cables de información, esto se debe a los fuertes campos electromagnéticos radiados por la corriente del rayo. El circuito de baja tensión, los generadores, los transformadores elevadores de los aerogeneradores impactados y no impactados y la red son amenazados. Otro daño de importancia es el BLACK-FLOW SURGE que causa daños en las turbinas impactadas y las que están cerca a esta, debido a la alta resistividad del terreno los pararrayos (SAs) en el sistema de puesta tierra operan de forma inversa permitiendo el flujo de corriente de rayo a la red (Abd-Allah et al., 2015).

2.4. Análisis de Riesgo

Los estándares de protección para estructuras elevadas propuestos por las normas IEC 62305, NTC 4552 y la IEC 61400-24 se basan principalmente en 3 parámetros: (1) Densidad de

rayos (N_g) de la región donde se instalará el aerogenerador; (2) Área colectora; (3) El factor localización (C_d). Teniendo en cuenta factores tales como que el rayo descendente es el tipo más frecuente de rayo y su incidencia está relacionada con la densidad local de rayos (N_g). Por su parte el rayo ascendente solo se considera en el factor ambiental, con otros factores como la complejidad del terreno y la altura sobre el nivel del mar (Pineda et al., 2018).

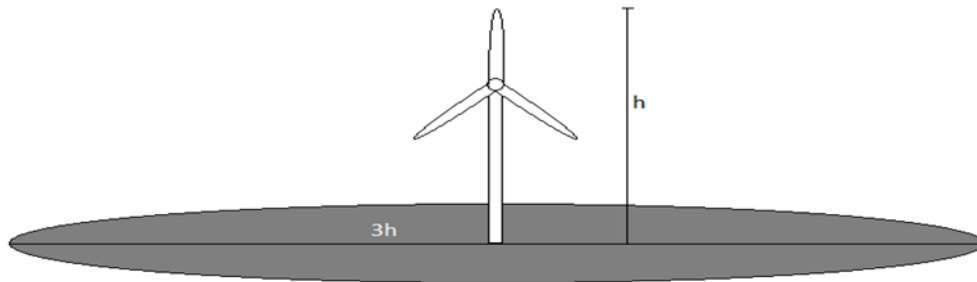
2.4.1. Densidad de rayos (N_g)

Esta información se obtiene generalmente por medio de los datos suministrados por las redes de sistemas localización de rayos (LLS). Es importante tener en cuenta que esta información no es totalmente fiable; se deben de considerar 2 aspectos para la estimación de N_g , uno es la eficiencia de detección (DE) de la información del rayo y el tamaño de la malla utilizada para obtener la densidad a tierra; la DE es la habilidad de los LLS de detectar eventos de rayo, en el caso de rayos ascendentes esta DE es muy baja (March, 2018).

2.4.2. Área colectora

El área colectora depende de las características de la estructura, en el caso de pequeñas estructuras el área colectora es igual a una distancia horizontal de 3 veces la altura de la estructura desde cualquier borde de esta (IEC 62305) (Abd-Allah et al., 2015). Sin embargo, en el caso de los aerogeneradores se utiliza la recomendación del estándar IEC 61400:24, que consiste en un área demarcada por una circunferencia con un radio de 3 veces la altura del aerogenerador centrada en la base del aerogenerador (Figura 9); cualquier rayo que tenga su punto final dentro de esta área impactara a las estructuras que se encuentra en ellas.

Figura 9. Esquema del área colectora de rayos para el caso puntual de un aerogenerador.



2.4.3. Factor localización

El factor de localización puede dividirse en 3 sub-factores, los cuales son la complejidad del terreno, la altura sobre el nivel del mar y la actividad de rayos de invierno. El grado de complejidad del terreno debe ser cuantificado ya que la forma del terreno (montañas o colinas) modifica el campo eléctrico local (efecto puntiagudo), la altura sobre el nivel del mar aumenta en el nivel de exposición de rayos (March, 2018), la actividad de rayos de invierno aumenta la actividad de rayos ascendentes, en Japón los rayos de invierno causan más del 99% de los impactos a aerogeneradores a la largo de la costa oeste (March et al., 2016).

2.5. Funcionamiento de la red LMA

En lo que respecta a la red LMA (Lightning Mapping Array) que se encuentra instalada en la zona de la ciudad de Barrancabermeja y alrededores, está conformada por 6 estaciones, ubicadas en los sitios mostrados en la Figura 10 siguiendo los parámetros expuestos a continuación:

2.5.1. La línea base

La distancia de separación entre sensores del sistema estuvo ubicada de 5Km a 25km aproximadamente.

2.5.2. La distribución de los sensores

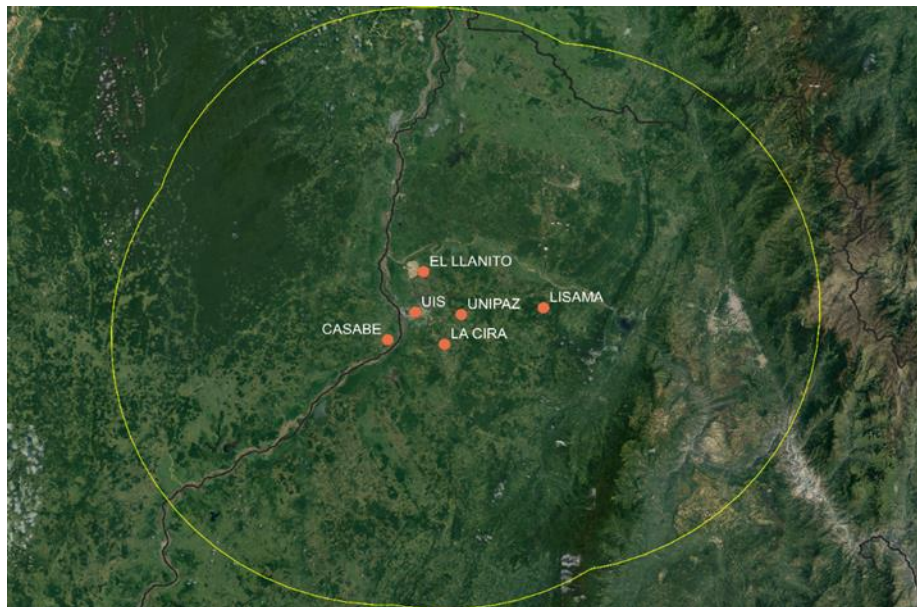
Logró encerrar una región, evitando fueran ubicados de manera alineada.

2.5.3. Los sitios idóneos para la ubicación de las estaciones

Se caracterizaban por tener condiciones de temperatura y humedad adecuadas para el cuidado de los equipos.

En general el sistema se utiliza para caracterizar tormentas eléctricas, por ejemplo, es posible deducir la distribución eléctrica de la tormenta, la forma en que se desarrolló el rayo identificando el tipo de líder, el desplazamiento y tamaño de la tormenta, etc.

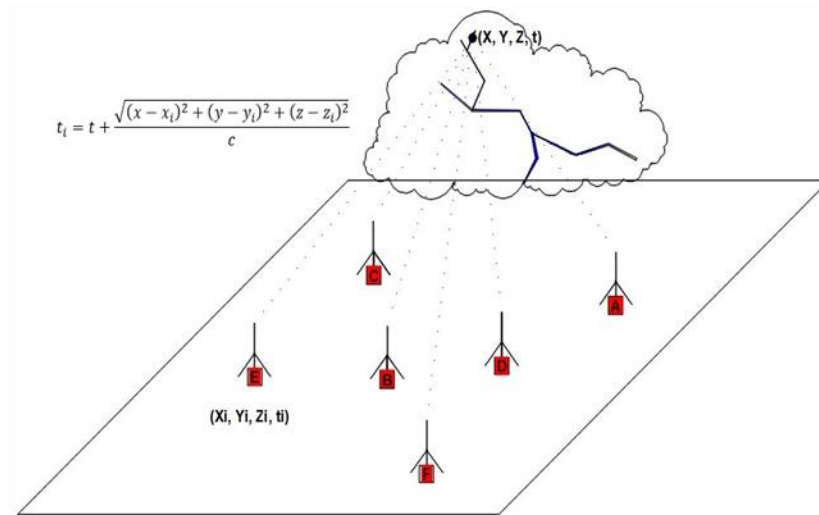
Figura 10. Ubicación de las estaciones de la red LMA en la zona de Barrancabermeja y sus alrededores. Tomado y modificado de QGIS



El sistema LMA permite realizar un arreglo en 3 dimensiones y evaluar el desarrollo de una descarga de rayos en función del tiempo a través del uso de una técnica básica desarrollada y operada en el Centro Espacial Kennedy. El proceso consiste en medir tiempos de llegada para ubicar puntos de actividad impulsiva de radiación VHF, los cuales se emiten durante las

descargas de rayos. En la figura 11 se muestra el esquema de funcionamiento del sistema LMA conformado por 6 estaciones tal cual como se realizó en la zona de Barrancabermeja.

Figura 11. Esquema general del funcionamiento del sistema LMA para 6 estaciones. Modificada de The New Mexico Tech 3D Lightning Mapping Array. W. Rison, R.J. Thomas, P.R. Krehbiel. (1999).



Al medir el tiempo de llegada en cuatro ubicaciones de los impulsos de radiación VHF, es posible encontrar la posición en tres dimensiones de la región fuente. Si el impulso de radiación VHF sucede en la posición (x, y, z) y en el tiempo t que es obtenido usando receptores GPS. El tiempo en que se capta la señal en una de las estaciones se puede expresar como se muestra en la siguiente ecuación:

$$t_i = t + \frac{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}}{c} \quad (9)$$

Donde, (X_i, Y_i, Z_i) representan la posición de las estaciones, t_i es el tiempo de llegada a la estación y c es la velocidad de las ondas electromagnéticas que en este caso son ondas de radio, equivalentes a la velocidad de la luz.

De una manera más detallada el funcionamiento del sistema LMA desde su etapa inicial, en la que se recibe la señal, hasta su etapa final en la que se almacenan los datos en el disco duro se describe de la siguiente forma: La antena en disposición vertical está sintonizada en el canal 3 de TV, es decir a 66 MHz. Posteriormente se realiza un ajuste de impedancia con el fin de evitar la aparición de ondas estacionarias y mantener la calidad de las señales que se reciben. Se realiza el proceso de filtrado de las señales recibidas por medio del uso de un filtro pasa banda de 6 MHz y se pre-amplifican las señales las cuales son sometidas a una segunda fase de filtrado dentro de la unidad de proceso LMA. Después mediante un amplificador logarítmico se provee la potencia de RF de la señal VHF. Finalmente, se digitaliza la señal de RF y se marca el tiempo de los picos por medio de la señal de temporización del GPS, este tiempo es almacenado en el disco duro de cada estación.

Los datos recolectados se visualizan y se analizan con el programa LMA Zoom Viewer, desarrollado en la UPC (Universidad Politécnica de Cataluña) por el grupo de investigación Lightning Research Group (LRG), dicho software posibilita el análisis de los datos en función del tiempo y el espacio en el que se desarrollan los rayos. Para la descripción de los rayos individuales utiliza la proyección de altitud-tiempo-distancia desarrollada por (Van Der Velde & Montanyà, 2013). Con el uso de este modelo es posible conocer el valor aproximado de las velocidades radiales de los líderes usando pendientes de referencia, los valores de estas pendientes son $2 \times 10^4 m/s$, que corresponde a valores de velocidad aproximada para líderes positivos $1 \times 10^5 m/s$ y $1 \times 10^6 m/s$, para velocidades de líderes negativos rápidos y muy rápidos respectivamente.

2.6. Red Colombiana de detección total de rayos con tecnología LINET

La red LINET al igual de la Red LMA utiliza la técnica de tiempo de llegada (TOA) para localizar impactos de rayo, esta red está compuesta por antenas de campo magnético que detectan las emisiones de campo en baja y muy baja frecuencia (LF/VLF) relacionadas con evento IC o CG que presentan fuertes corrientes que fluyen a lo largo de canales relativamente largos, que en el caso de CG inician desde el punto de impacto a tierra (Aranguren et al., 2013). La red colombiana de detección total de rayos LINET (figura 12) fue instalada en el año 2011 por Keraunos S.A.S., la red cuenta con 15 sensores que ofrecen cobertura al 80% del territorio continental colombiano y su eficiencia de detección es del 95%, todos sus sensores se encuentran a una distancia inferior de 200 km del sensor más cercano, estos sensores están ubicados de la siguiente forma (Keraunos S.A.S., 2016):

Tabla 2. Ubicación de los sensores de la Red LINET.

No	Ubicación	Distancia al sensor más cercano (km)	No	Ubicación	Distancia al sensor más cercano (km)
1	ALBANIA	248	10	LA JAGUA	104
2	ARAUCA	215	11	MEDELLIN	108
3	BARRANCA	153	12	MONTERIA	152
4	BARRANQUILLA	248	13	NEIVA	104
5	BOGOTA	119	14	PALMIRA	131
6	CAMPO RUBIALES	292	15	PASTO	215
7	CHIGORODO	152	16	PUERTO TRIUNFO	108
8	CUCUTA	174	17	TUNJA	119
9	IBAGUE	134		Promedio	163

Figura 12. Ubicación de los sensores de la Red de localización de Rayos LINET.



2.7. Protección de aerogeneradores

Para este apartado fueron estudiadas las recomendaciones propuestas por la norma IEC61400-24. En primer lugar, el aerogenerador debe de ser dividido en áreas físicas que definen el nivel de influencia del rayo en los componentes de esa zona (Figura 13), de esta forma se asegura una protección sistemática y suficiente para todos los componentes del aerogenerador. Estas zonas se definen dependiendo si es o no posible un impacto directo, la magnitud de la

corriente del rayo y el campo eléctrico y magnético esperado. De esta forma se asegura que todos los componentes pueden soportar los efectos que puede entrar en la zona en la que se encuentran ubicados. A continuación, serán descritas dichas zonas de afectación (Tabla 3) y conjuntamente se enunciarán los diferentes métodos de protección y mitigación del impacto.

Figura 13. División de las zonas de afectación por rayos de un aerogenerador.

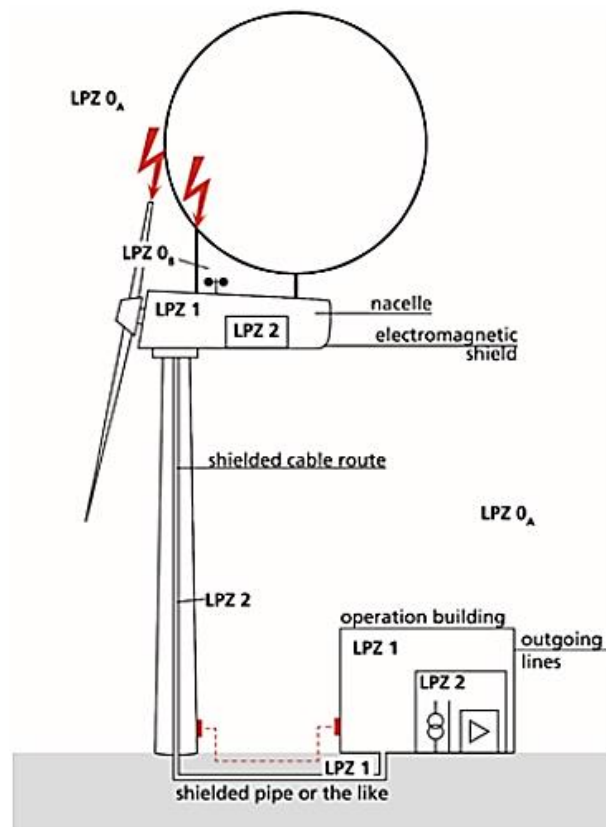


Tabla 3. Descripción de las zonas de afectación por rayos en un aerogenerador. Según IEC 62305-1. Adaptado de IEC61400:24:2019

Zona exterior	
LPZO_a	Zona donde la amenaza se debe al impacto directo y al campo electromagnético completo del rayo.
LPZO_b	Zona protegida contra impactos directos, pero sin atenuación del campo electromagnético.
Zona interior	
LPZ1	Zona protegida contra impactos directos de rayo, en la cual las sobrecorrientes se ven limitadas por los sistemas de protección, los efectos del campo electromagnético son atenuados por la barrera entre zonas.
LPZ2	Zona donde la sobrecorriente puede verse limitada aún más por el uso compartido de corriente y por DPS adicionales en el límite. Puede usarse un blindaje espacial adicional para atenuar aún más el campo electromagnético del rayo.

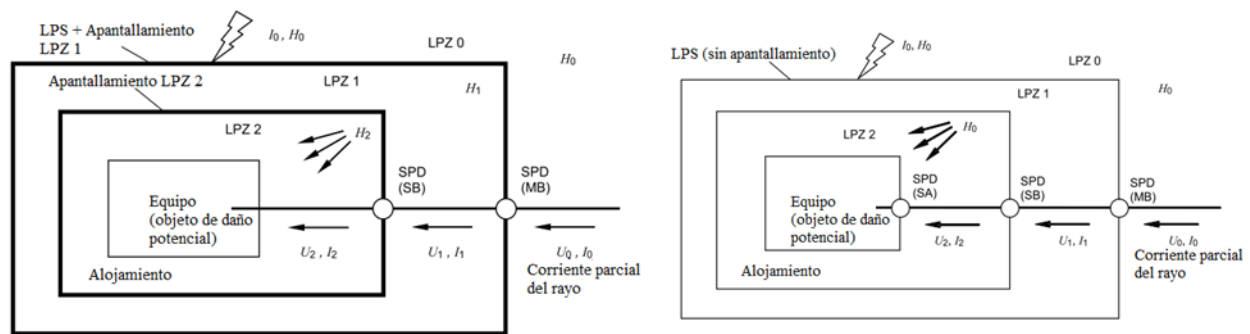
Nota: En general, cuanto mayor sea el número de una zona individual, menores serán los parámetros del entorno electromagnético. La limitación de corriente por distribución de corriente se refiere a la reducción de la carga de corriente de los conductores individuales de un sistema de protección contra rayos debido a la distribución de la corriente del rayo original entre varios conductores.

2.7.1. Límite entre zonas

El objetivo de esta técnica es el de reducir la corriente y el voltaje a un nivel tolerable para el equipo colocado en la zona de protección con el número más alto, esto se logra mediante prácticas adecuadas de conexión, apantallamiento y protección contra sobretensiones de cables en el límite de la zona (Figura 14). Es el caso del uso de DPS, de acuerdo con IEC 62305-4 los

DPS deben de ser instalados en la línea de entrada de cada LPZ, si no están localizados a la entrada de LPZ debe ser documentado que el equipo conectado en ambos extremos de la entrada puede hacer frente a los impulsos de voltaje esperados. Se debe asegurar que el impulso de corriente conducido no compromete el ambiente magnético en la LPZ a la que ha ingresado, si el DPS se encuentra a más de 10 m del equipo que debe proteger es necesario tomar medidas adicionales.

Figura 14. Medidas de protección, tomadas de IEC21400:24.

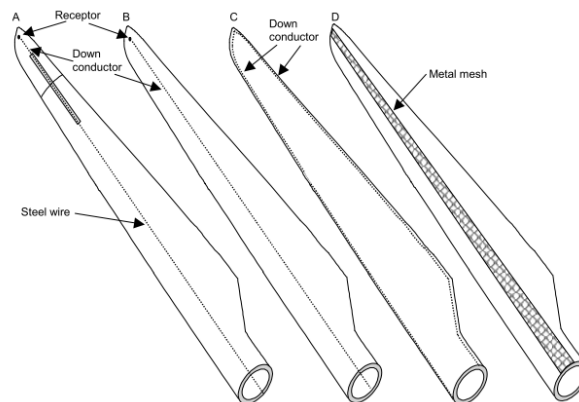


Nota. Protección contra sobretensiones usando apantallamiento espacial y coordinación de DPS o usando solo coordinación de DPS.

2.7.2. Protección para las Palas

Los elementos más expuestos son las palas del aerogenerador; para su protección se emplea un sistema de captación y de conductores bajantes (**Figura 15**) que se encargan de la interceptación del rayo y la conducción de su corriente de forma segura. Para lograr esta captación segura de la descarga se usan materiales conductores como el cobre, aluminio, acero o aleaciones de estos y adicionalmente se determina que el área mínima de su sección transversal debe ser de $50mm^2$, esta puede reducirse a $25 mm^2$ en aplicaciones donde su fuerza mecánica no es un requerimiento esencial.

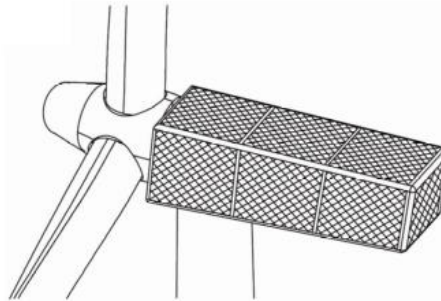
Figura 15. Geometría de las palas de un aerogenerador.



2.7.3. Góndola

La estructura de la góndola debería ser parte del sistema de protección contra rayos de tal modo que se asegure que una conexión de rayo a cualquiera de las partes metálicas sea capaz de soportar los esfuerzos de igual forma que el sistema de captación diseñado para este propósito. Se propone que las góndolas cubiertas de GFPR tengan un sistema de captación de conductores bajantes, dicho sistema generalmente tiene forma de una caja que la recubre. Los conductores deben de ser elegidos de acuerdo con el nivel de protección contra rayos (LPL). Adicionalmente, se debe establecer un sistema de conexión equipotencial en el cual se incluyen las estructuras metálicas principales creando un plano equipotencial (Figura 16), en este se conectan las tierras y las conexiones equipotenciales.

Figura 16. Esquema de protección para la góndola de un aerogenerador.



2.7.4. Buje

Para grandes turbinas el buje es una esfera de hierro de varios metros en diámetro, el grosor del material asegura que la estructura sea inmune al rayo. La estructura se puede convertir en una jaula de Faraday que provee un apantallamiento magnético y su protección de rayos está limitada a la conexión equipotencial y la protección de transitorios de los sistemas ubicado fuera del buje.

2.7.5. Torre

Una torre de acero tubular normalmente cumple con las dimensiones requeridas para conductores bajantes estipulados en IEC 62305-3 y puede considerarse casi como un escudo electromagnético perfecto, como una jaula de Faraday. Por lo tanto, en la mayoría de los casos es razonable definir el interior de la torre como una zona de protección ZPR1 o ZPR2. Toda la torre y las partes metálicas principales deberían incluirse en el conductor de protección y el sistema de conexión equipotencial para realizar la mejor protección ofrecida por la jaula de Faraday.

2.7.6. Tren de transmisión mecánico y sistema de orientación

El aerogenerador tiene rodamientos que permiten la orientación de las palas, la rotación del eje principal, del multiplicado, del generador y el sistema de orientación. Estos pueden servir

de puente entre diferentes partes del aerogenerador, por esto deben de ser protegidos para atenuar la corriente que pasa a través de los componentes a un nivel tolerable, para ello se propone establecer un camino paralelo a la corriente que ofrecen una impedancia considerablemente menor al camino natural a través de los componentes; se recomienda el uso de descargadores y contactos deslizantes.

2.7.7. Sistema eléctrico de baja tensión y sistemas electrónicos

Los sistemas eléctricos y de control están sujetos a daños por impulso electromagnético del rayo (IER), por lo tanto, deben implementarse medidas de protección contra sobretensión para evitar fallas en estos sistemas. Para lograr dicha protección se requiere un acercamiento sistemático del concepto de zonas de protección (ZPR) de acuerdo con IEC 62305-4. Las medidas de protección contra sobretensión es parte del concepto de ZPR descrito en el anexo E de la norma.

2.7.8. Sistemas eléctricos de potencia de alta tensión

Los dispositivos de protección en alta tensión son denominados pararrayos, en aerogeneradores se utilizan para proteger el transformador y el sistema de alta tensión contra aumentos de potencial debido a las corrientes de rayo que pasan a través del sistema de puesta a tierra, además de esto protege contra la entrada de voltajes transitorios desde el cableado de alta tensión fuera del aerogenerador. La necesidad de pararrayos en el lado de alta tensión del transformador debería ser evaluado basado en los principios de la IEC 62305-2 y IEC 60071.

En lo que respecta a los componentes de los pararrayos deberían utilizarse óxido metálico sin brechas de acuerdo con IEC 60099-4 los cuales deben de ser seleccionados y aplicados en conformidad con IEC 60099-5. Deben de ser localizados preferiblemente en los terminales de

alta tensión del transformador, puede ser conveniente colocar DPS en el lado de baja tensión del transformador como precaución, especialmente si transitorios significativos pueden pasar a través del transformador desde el lado de alta tensión.

2.7.9. Puesta a tierra del aerogenerador

El diseño del sistema de puesta a tierra debe corresponder con el LPL para el cual el sistema de protección del aerogenerador es diseñado, deben de cumplir 4 requerimientos básicos de diseño:

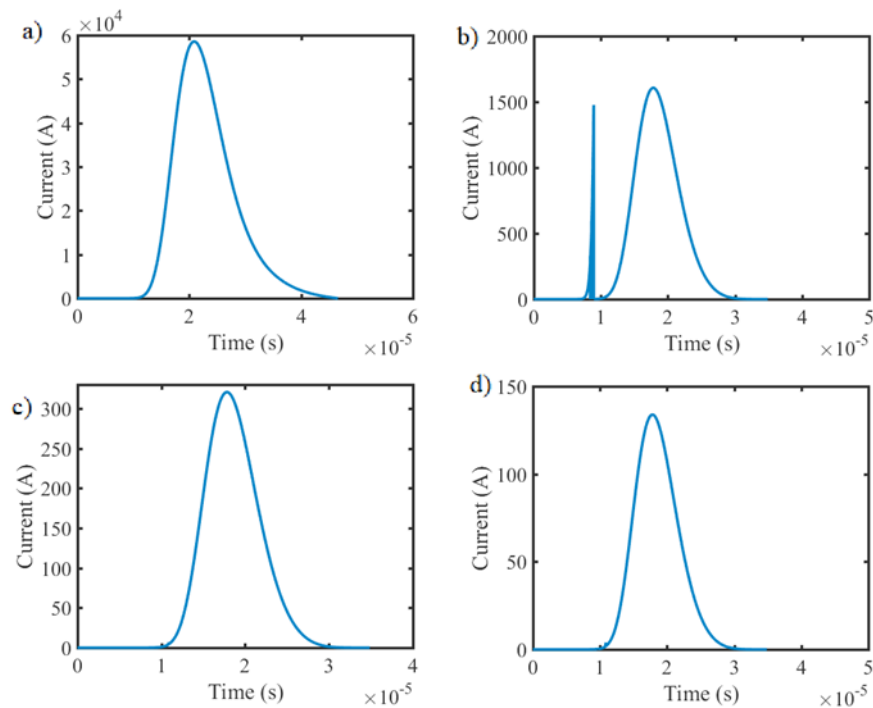
- Asegurar la protección del personal
- Prevenir el daño de los equipos
- Soportar las fuerzas térmicas y electromagnéticas a las que era sujeto durante corriente de falla y exposición a rayos
- Tener suficiente resistencia a fuerzas mecánicas y corrosión a largo plazo

2.7.10. Otros métodos de protección

2.7.10.1. Protección del soporte principal. Se utilizan descargadores o contactos deslizantes, por ejemplo, en (Goud et al., 2016) analizaron la simulación de la combinación de los descargadores o contactos deslizantes. En dicho análisis encontraron mejores resultados que el uso de cualquiera de los dos por separado, observaron que cuando no hay un camino alternativo la corriente que fluye a través del soporte alcanza un valor pico de 60 kA (Figura 17(a)), añadiendo un descargador en paralelo se disminuye a 1.6 kA (Figura 17(b)) debido a que es necesario llegar al umbral de campo para la ionización, y con el uso de contactos deslizantes

(escobillas) (Figura 17(c)) y con la combinación de los dos se disminuye a aproximadamente 140 A (Figura 17(d)).

Figura 17. Gráficas del comportamiento de los descargadores y contactos deslizantes usados como protección del soporte principal del aerogenerador, tomado de (Goud et al., 2016)

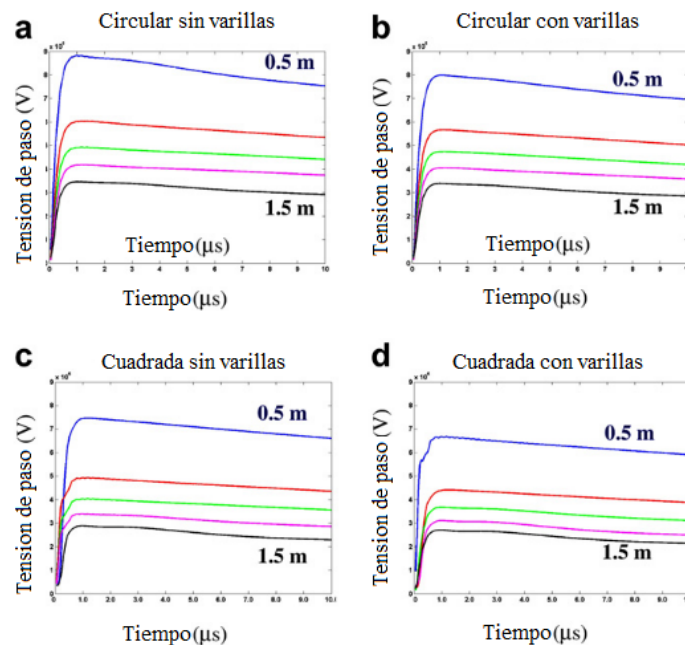


2.7.10.2. Resistencia de amortiguación. El uso de anillos de ferrito en la base de las palas del aerogenerador contribuye en la disminución de los efectos del impacto de rayos en los componentes de la granja eólica, cuando la corriente fluye a través del anillo de ferrito, la energía es almacenada temporalmente en forma de campo magnético, esto resulta en un alto consumo de la energía, lo que conduce a una alta amortiguación de la sobretensión del rayo (Abd-Allah et al., 2015)

2.7.10.3. Geometría de la puesta a tierra. En los estudios realizados por (Ukar & Zamora, 2011) estudiaron mediante simulación los efectos de la geometría y el tamaño de la malla de puesta a tierra (circular y cuadrada), además de la profundidad, el uso de varillas y la

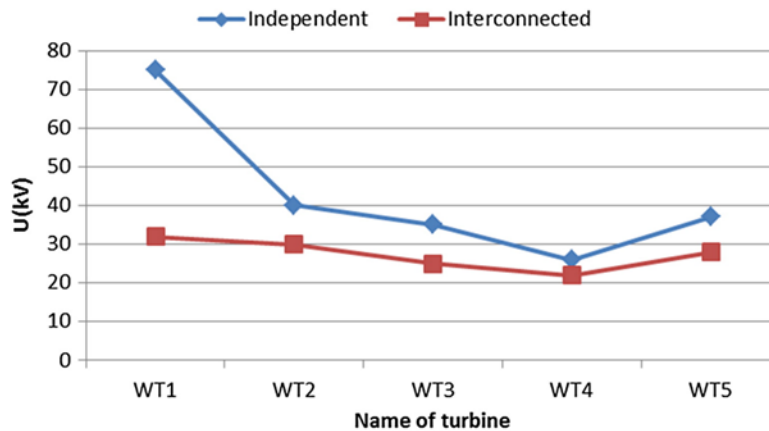
interconexión de las mallas de varios aerogeneradores, los resultados demostraron que la malla cuadrada ofrece una tensión de paso 20% menor a las de la circular para todos los casos (Figura 18), incluso cuando la malla cuadrada no utilizaba varillas y la circular si se obtenían tensiones de paso similares o menores.

Figura 18. Tensiones de paso a 0.5, 0.8, 1.0, 1.2 y 1.5 m de profundidad. Tomado de (Ukar & Zamora, 2011)



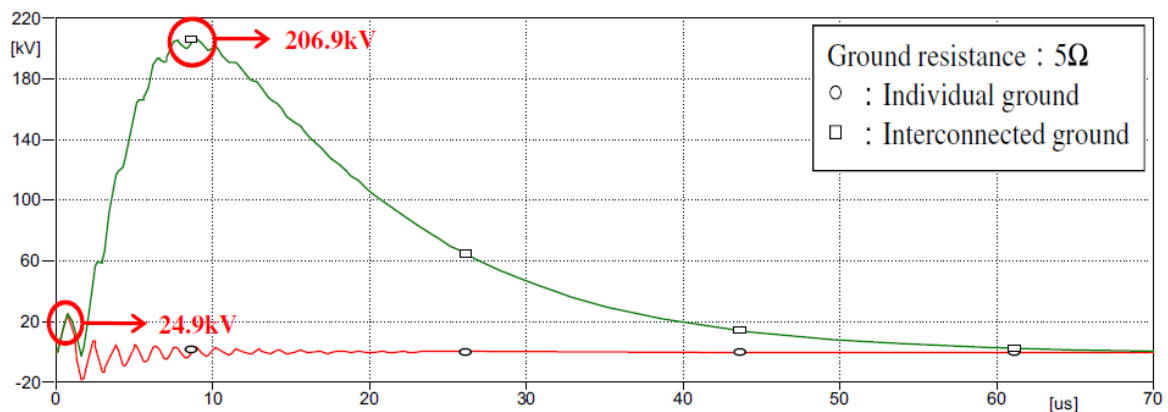
2.7.10.4. Back Flow. En (Nguyen et al., 2017) encontraron que un pararrayos que estaba instalado en el lado de baja tensión del aerogenerador se encontraba, dañado de allí nació la hipótesis del flujo inverso. Basados en esta suposición mediante simulación analizaron el efecto de la interconexión del sistema de puesta a tierra en un grupo de aerogeneradores cuando ocurre una sobretensión producida por el flujo inverso durante una descarga de rayo. La sobretensión en ambos lados del transformador elevador de la turbina impactada en modo de interconexión disminuyó aproximadamente la mitad en comparación con el modo aislado (Figura 19).

Figura 19. Sobretensión en el lado de alta tensión del transformador elevador. Tomado de (Nguyen et al., 2017)



2.7.10.5. Protección del circuito de control. Cuando un aerogenerador es impactado por un rayo, las rápidas variaciones de la corriente del rayo inducen voltajes transitorios que dañan el equipo electrónico, en (Jiang et al., 2013) analizaron el proceso de la protección contra rayos para determinar si la interconexión de los sistemas de puesta a tierra de la torre y del sistema de control pueden mitigar el daño causado por impactos de rayo, en el caso de tierras interconectadas el impacto de rayo resulta en un voltaje transitorio mayor (Figura 20).

Figura 20. Sobretensión transitoria de tierras individuales e interconectadas, tomada de (Jiang et al., 2013)



3. METODOLOGIA

Para el desarrollo de este proyecto se identificaron las estructuras más elevadas en el área de influencia de la red LMA, para esto se utilizaron Google Earth Pro y Google Street View, con la ayuda de estas herramientas se realizó una inspección visual y se encontraron más de 600 estructuras de altura considerable con respecto a sus alrededores, se utilizaron los impactos suministrados por la red LINET a cada estructura para seleccionar las que tuvieron el mayor número de eventos y con ayuda del software LMA Zoom Viewer desarrollado por la Universidad Politécnica de Cataluña se realizó el análisis del desarrollo de los rayos que generaron impacto en las estructuras con el mayor número de eventos en un periodo de tiempo comprendido entre octubre de 2018 y noviembre de 2019.

3.1. Zona de estudio

Este análisis comprende las estructuras ubicadas en el municipio de Barrancabermeja y sus alrededores que se encuentran dentro del área de influencia de la red LMA (Figura 10).

3.2. Estructuras de estudio

En el área de influencia del sistema LMA se encontraron más de 600 estructuras elevadas. Con ayuda de la red de detección total de rayos LINET se identificaron las estructuras con la mayor cantidad de impactos, para esto se utilizó un área con un radio de 300 metros alrededor de cada una y se asignaron los impactos a cada estructura, se omitieron los datos que tenían corrientes de retorno con magnitudes menores a 10 kA.

3.3. Análisis de la interacción de rayos con estructuras elevadas

Para desarrollar el análisis fueron seleccionados 26 eventos de los cuales 21 son CG- y 5 CG+, en esta parte del estudio se hizo uso del Software LMA Zoom Viewer, en el cual se genera un mapeo de las fuentes detectadas por la red LMA. Este mapeo consta de 4 gráficos en la vista principal (Figura 21): el superior es la gráfica tiempo altura y muestra en que instante de tiempo se detectaron fuentes y la altura a la cual se localizaron, el grafico lateral izquierdo es la vista de planta (latitud vs longitud), los dos gráficos laterales derechos el superior (longitud vs altura) y el inferior (latitud vs altura), además de esto contamos con el grafico de Tiempo-Distancia en el cual se puede observar la velocidad radial del líder (Figura 22), la altura se puede estimar gracias a el color de las fuentes, de esta forma podemos encontrar la altura de iniciación y propagación del líder; en la gráfica se encuentran 3 líneas punteadas que sirven de guía para estimar la velocidad de propagación.

Figura 21. Vista principal LMA Zoom Viewer.

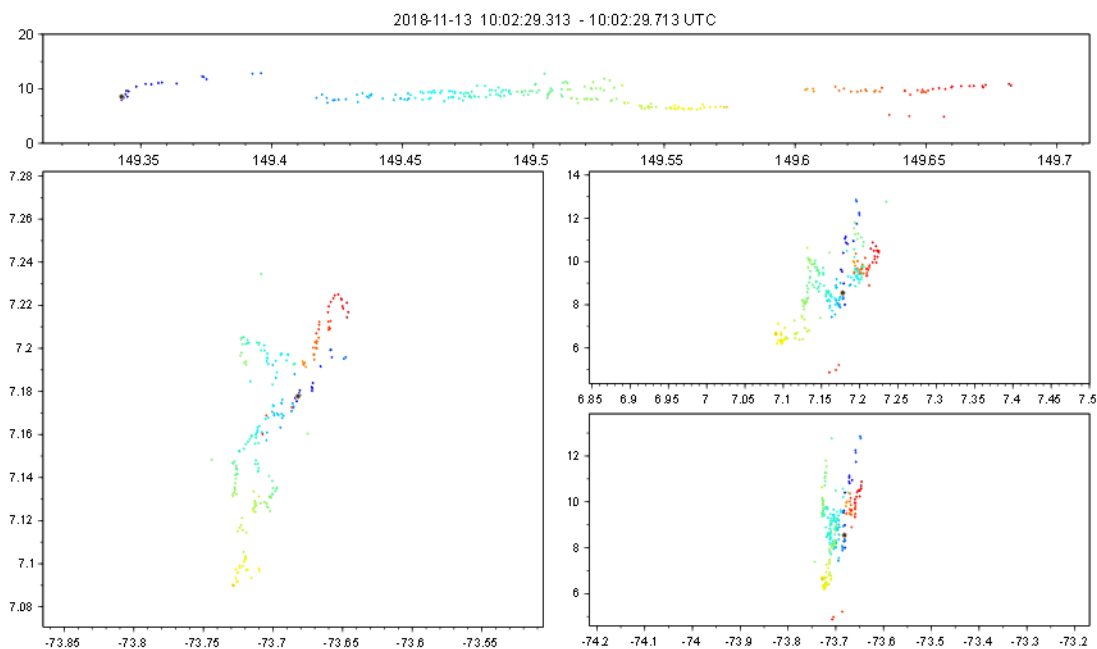
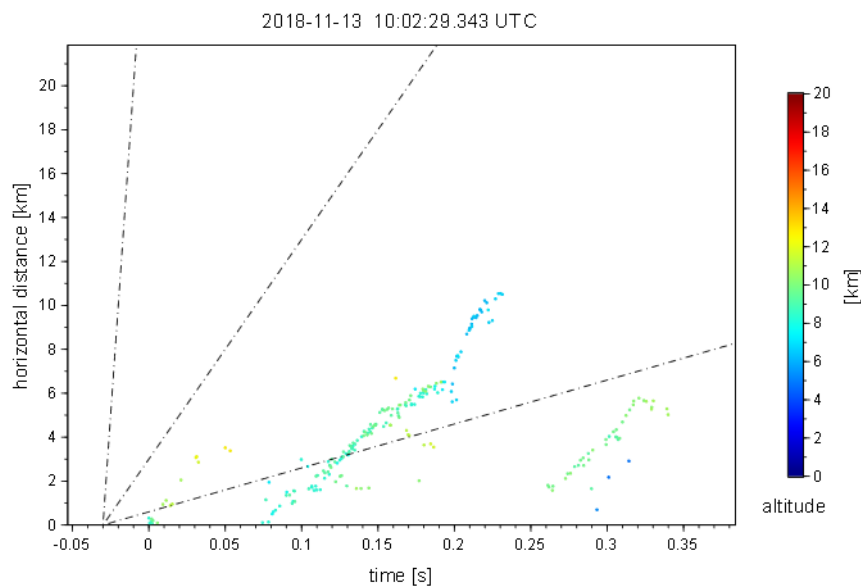


Figura 22. Gráfico Tiempo-Distancia LMA Zoom Viewer.



3.4. Análisis de riesgo

Para este análisis fueron utilizadas y comparadas las normas IEC 62305, NTC 4552 y la IEC 61400-24; adicionalmente se utilizó la ecuación de (Eriksson, 1987) para calcular el número de eventos a estructuras elevadas (EE). La ecuación del número de sucesos peligrosos a la estructura en las tres normas se presenta de manera muy similar, la diferencia más notable radica en el cálculo de la densidad de descargas a tierra (DDT) y en ingles Ng. Para efectos de esta investigación fueron usados los datos de sistemas de localización de rayos, en caso de no contar con la información es posible utilizar la densidad total de rayos desde la página de la NASA para calcular Ng.

3.4.1. NTC 4552

$$DDT = 0.0017 * N_c^{1.56} \quad (10)$$

$$N_D = DDT * A_D * C_D * 10^{-6} \quad (11)$$

3.4.2. IEC62305

$$N_G = 0.1 * Td \quad (12)$$

$$N_D = N_G * A_D * C_D * 10^{-6} \quad (13)$$

3.4.3. IEC61400-24

$$N_D = N_{SG} * A_D * C_D * 10^{-6} \quad (14)$$

$$N_G = 0.25 * N_T ; N_G = \frac{N_{GLLS}}{DE} \quad (15)$$

$$N_{SG} = 2 * N_G \quad (16)$$

3.4.4. ERIKSSON

$$N_S = 2.4 * 10^{-5} H^{2.05} \quad (17)$$

$$N_G = 1 * km^{-2} * año^{-1} \quad (18)$$

N_C = Nivel cerámico o número de días de tormenta al año (Td)

N_G = Densidad de descargas a tierra (DDT) rayos/km²

N_D = Numero de eventos peligrosos por impacto directo a la estructura

N_S = Numero de total de flashes a una estructura elevada

N_t = la densidad total anual de rayos (CG+IC) visibles/km² (se puede obtener desde la página web de la NASA)

$N_{G\text{LLS}}$ = la densidad anual promedio de flashes a tierra obtenida del **LLS**

DE = Eficiencia de detección del **LLS**

Para facilitar el cálculo del área colectora de las edificaciones se tomaron como si todas fueran rectangulares y se utilizó la ecuación 19:

$$A_D = L * W + 2 * (3 * H) * (L + W) + \pi * (3 * H)^2 \quad (19)$$

Esta ecuación es usada por la IEC-62305 y la NTC-4552, en el caso de las torres de telecomunicaciones se utilizó un área colectora igual a:

$$A_D = 9 * \pi * H^2 \quad (20)$$

También se emplea la ecuación de (Eriksson, 1987) para el cálculo de flashes EE. Para valores de N_G diferentes a 1; N_s se puede expresar:

$$N_s = N_g * 2.4 * 10^{-5} H^{2.05} \quad (21)$$

El factor de localización es igual para la NTC-4552 y la IEC-62305, en el caso de la IEC61400-24 este es la sumatoria de 3 factores.

Tabla 4. Factor de localización para las normas NTC-4552 e IEC-62305

Factor de localización C_D NTC 4552 e IEC62305	
0.25	si está rodeado de edificios más altos
0.5	si está rodeado de objetos de la misma altura o inferior
1	si es una estructura aislada
2	si es una estructura aislada en la parte superior de una colina o un montículo

$$C_D = C_{DWL} + C_{DC} + C_{DH} \quad (22)$$

C_{DWL} = el factor debido a la actividad de rayos de invierno

C_{DC} = el factor debido a la complejidad del terreno local

C_{DH} = el factor debido a la altura sobre el nivel del mar

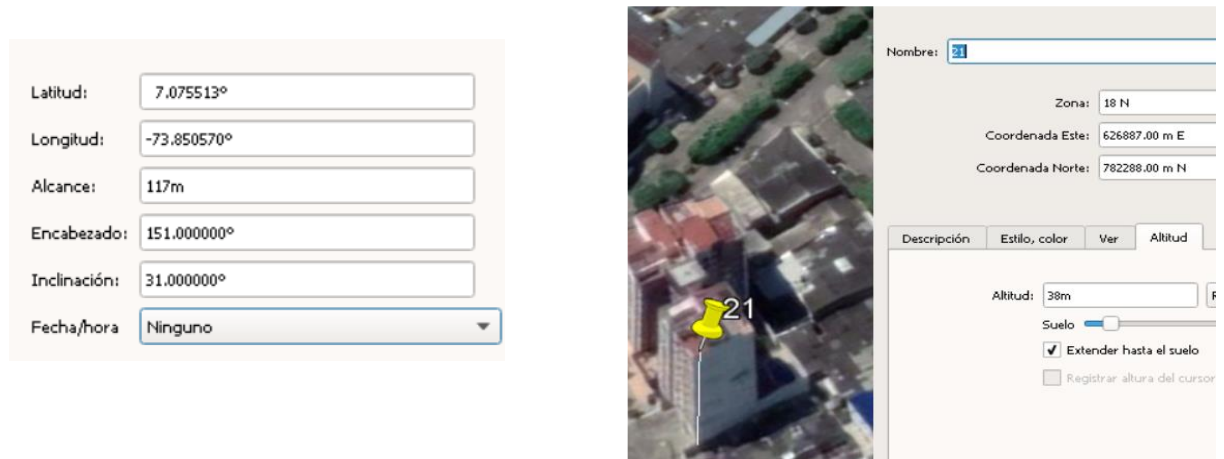
Estos son parámetros individuales que varían dependiendo de la ubicación

Tabla 5. Valores para el factor de localización según las características del terreno.

Rayos de invierno (C_{DWL})		Complejidad del terreno (C_{DC})			Altura sobre el nivel del mar (C_{DH})	
Nivel de actividad	Valor C_{DWL}	Descripción	Índice de complejidad ^b	Valor C_{DC}	Descripción	Valor C_{DH}
Sin actividad	0	Plano o moderado	<0.3	1	< 800 m	0
Baja actividad	2	colina	0.3 a 0.4	3	800 a 1000 m	1
Actividad media	4	montaña	>0.4	4	>1000 m	2
Actividad alta	6					

Para realizar el cálculo aproximado de la altura de las estructuras, primero se utilizó Google Earth para de forma visual contar la cantidad de pisos de los edificios, después se utilizó 2.7 metros como altura estándar por piso, ya con esto se obtuvieron las alturas de los 13 edificios, con estas alturas se buscó la orientación del mapa en la cual la altura medida por la herramienta marcación fuera aproximadamente igual a la calculada, esto ocurría cuando encabezado estaba a 151° y la inclinación a 31° (Figura 23)

Figura 23. Capturas de pantalla de Google Earth utilizando la herramienta de marcación para calcular la altura.



Vemos que la altura calculada es de 38 m con respecto al suelo, este edificio cuenta con 14 pisos, lo que nos da una altura de aproximadamente 37.8m.

4. RESULTADOS

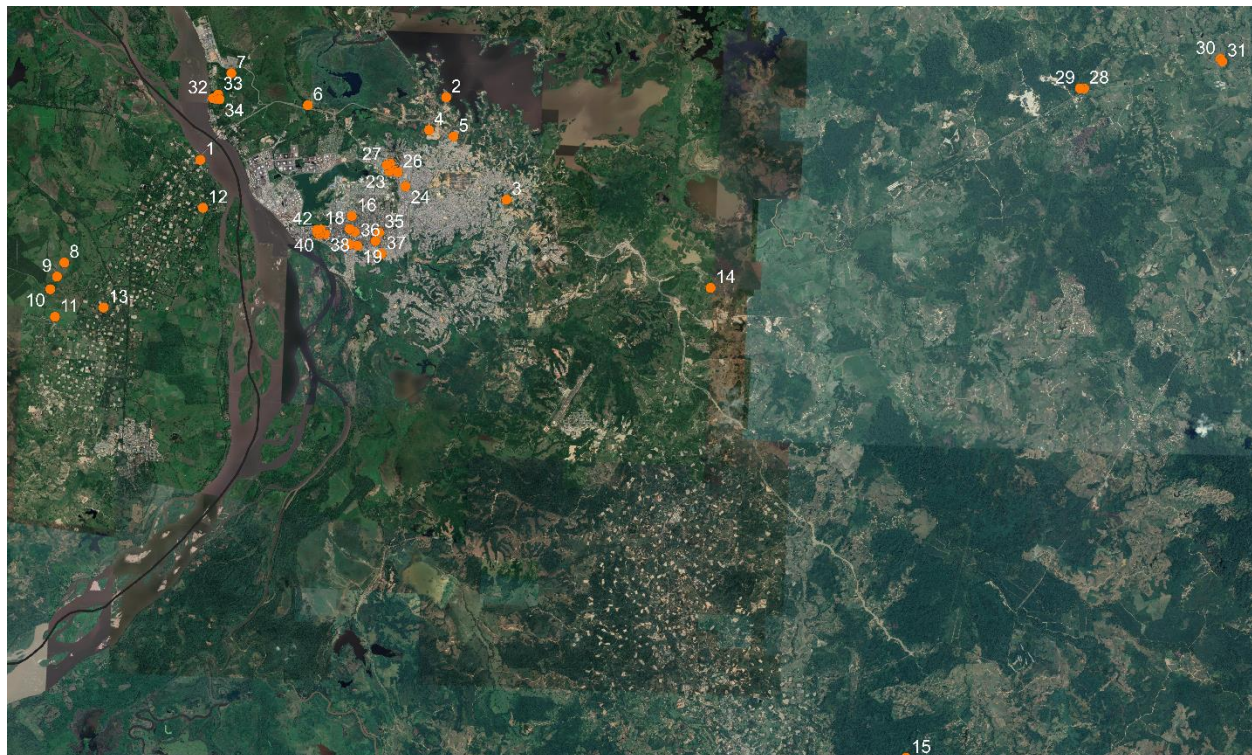
4.1. Estructuras de estudio

En total se eligieron 42 estructuras de las cuales 20 eran torres de transmisión, 3 antenas de telecomunicaciones y 19 edificios (Figura 24), la altura de estas varía en un rango de entre 13.5 y 113 m. Se debe tener en cuenta que varias de estas estructuras impactadas se encuentran ubicadas de manera cercana y, por consiguiente, su área de captación se sobrepone. Para el análisis fue necesario identificar la cantidad de strokes que conformaban cada flash, ya que era posible que un flash impactara a varias estructuras así estas no estuvieran relativamente cerca. El total de impactos a las 42 estructuras seleccionadas es de 286 flashes, la sumatoria de impactos es mayor al total de flash ya que en varias ocasiones impactaron a más de una agrupación de estructuras.

Tabla 6. Tipos de estructuras y cantidad de flashes.

Estructuras	Impactos	Tipo de estructura	Estructuras	Impactos	Tipo de estructura
1	5	Transmisión	13	14	Transmisión
2	10	Transmisión	14	12	Transmisión
3	11	Transmisión	15	7	Transmisión
4	9	Transmisión	16-17-18-19-20	31	Edificios
5	10	Transmisión	21-22-23-24-25-26-27	30	Edificios y Telecomunicaciones
6	9	Transmisión	28-29	15	Transmisión
7	8	Transmisión	30-31	11	Transmisión
8-9	22	Transmisión	32-33-34	11	Transmisión
10	12	Transmisión	35-36-37	29	Edificios
11	14	Transmisión	38-39-40-41-42	14	Edificios
12	14	Telecomunicación	TOTAL		286

Figura 24. Estructuras de estudio dentro del área de influencia de la Red LMA



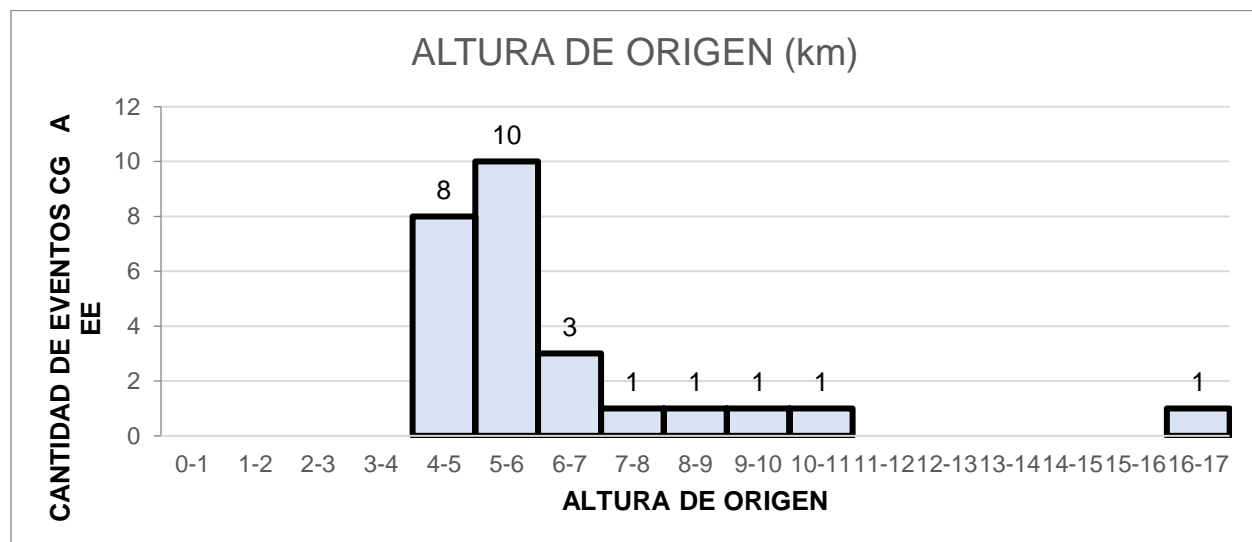
4.2. Interacción

En este apartado se caracterizan los líderes que causaron impactos en estructuras elevadas en cuando a alturas de iniciación, distancia al origen, fuente más baja mapeada y corriente.

4.2.1. Alturas de iniciación

En la Figura 25 puede observar que 22 de los 26 eventos CG analizados con el software LMA Zoom Viewer iniciaron por debajo de 7.5 km de altura. según (López et al., 2016) a esta altura se encuentra normalmente el centro de carga negativo, el 84.9% de los impactos CG analizados se generaron entre la región de carga positiva inferior y la región de carga negativa, demostrando la importancia de la región de carga inferior positiva en la generación de eventos CG.

Figura 25. Cantidad de los eventos CG que impactaron es las estructuras de estudio Vs Alturas de origen.



4.2.2. Distancia al origen, fuente más baja y corriente.

4.2.2.1. Eventos CG-

A continuación, se presenta el listado de los eventos GC analizados. Entre los parámetros más importantes se tienen las alturas de origen, cantidades de impactos, alturas y velocidades de propagación; con estos datos se puede identificar el tipo de líder que produce el impacto y las regiones de carga.

Tabla 7. Lista de los eventos GC- a las estructuras seleccionadas junto con sus principales atributos.

Eventos	A	B	C	D	E	F	G	H
No de líderes	1	3	4	4	4	3	1	3
Dmax líder al origen	2.364	12.083	2.732	3.689	5.245	5.096	2.783	7.218
Origen (km) altura	5.398	4.842	5.798	4.968	5.322	4.515	6.355	5.093
Corriente	-24.6	-15.8	-10.2	-12.9	-14.5	-31.8	-47.3	-44
Dmax CG- (km) al origen	2.981	4.602	2.756	1.484	3.583	2.138	0.505	2.595
No de impactos	1	7	3	4	3	4	1	9
Duración (seg)	0.449	1.069	0.306	0.44	0.34	0.253	0.25	1.052
Altura más baja registrada	1.758	2.959	1.426	1.418	1.43	1.518	1.735	2.152
Estructura No	28-29	14	35-36-37	35-36-37	3	12	35-36-37	14

Figura 26. Mapeo evento A CG-

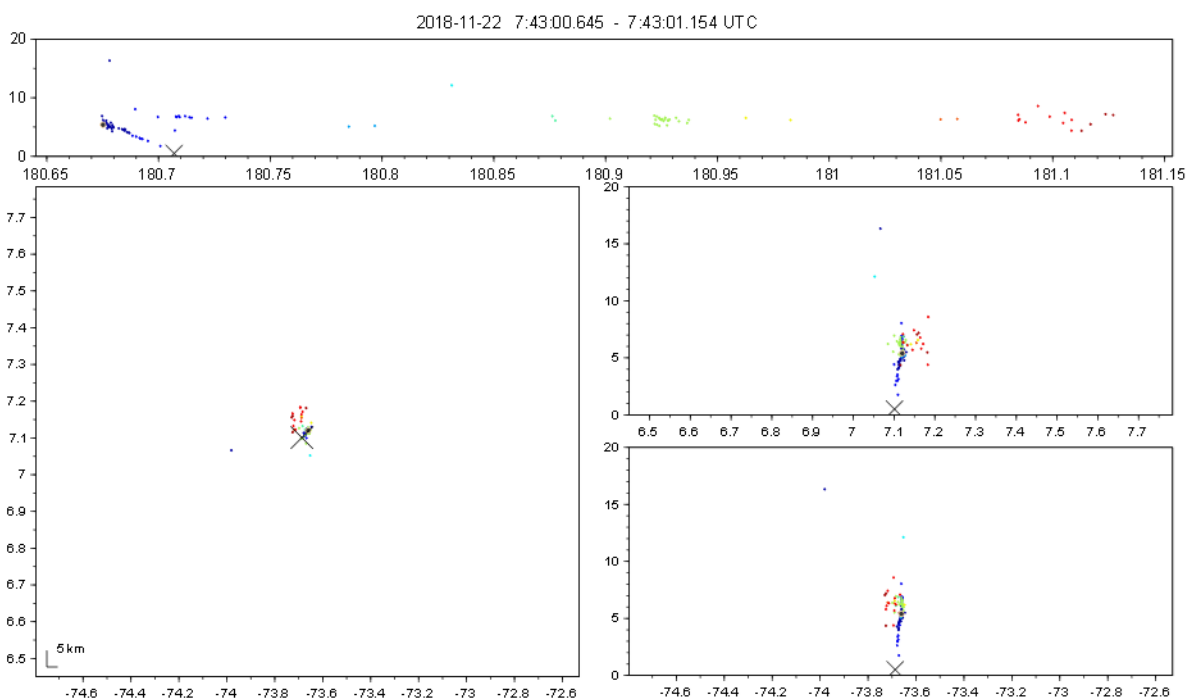
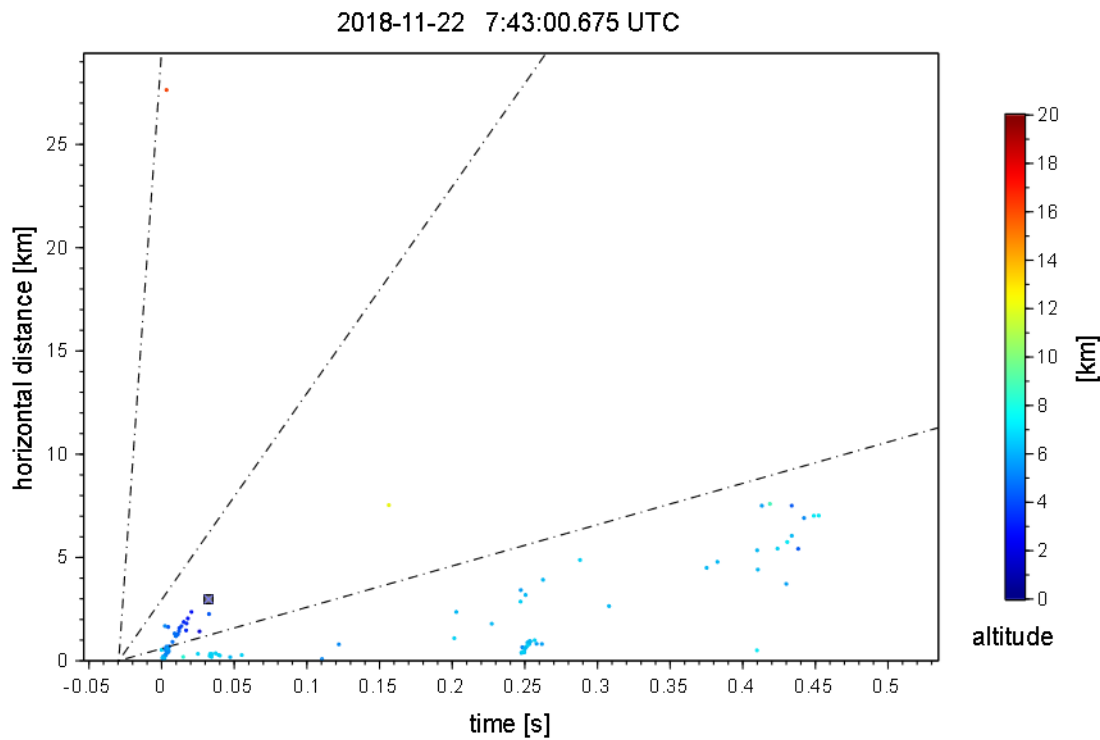


Figura 27. Evento A CG-, relación tiempo y distancia de las fuentes

En la figura 26 se observa el inicio del líder a aproximadamente 5.5 km de altura, en la figura 27 se puede ver que se trata de un líder negativo, ya que exhibe la velocidad radial característica de estos, presenta un desplazamiento horizontal de 3 km con respecto a su origen y genera un impacto CG- con una corriente de -24.6 kA en $t=0.032s$ en el área compartida de las estructuras No 28 y 29 (2 torres de transmisión) a 15 km del casco urbano de la ciudad de Barrancabermeja, después del impacto en $t=0.2$ s se pueden ver fuentes de color azul claro que siguen la pendiente de líderes positivos, estas fuentes se deben a líderes retrógrados negativos con una altura entre 4.4 y 7.5 km.

Figura 28. Mapeo evento B CG-

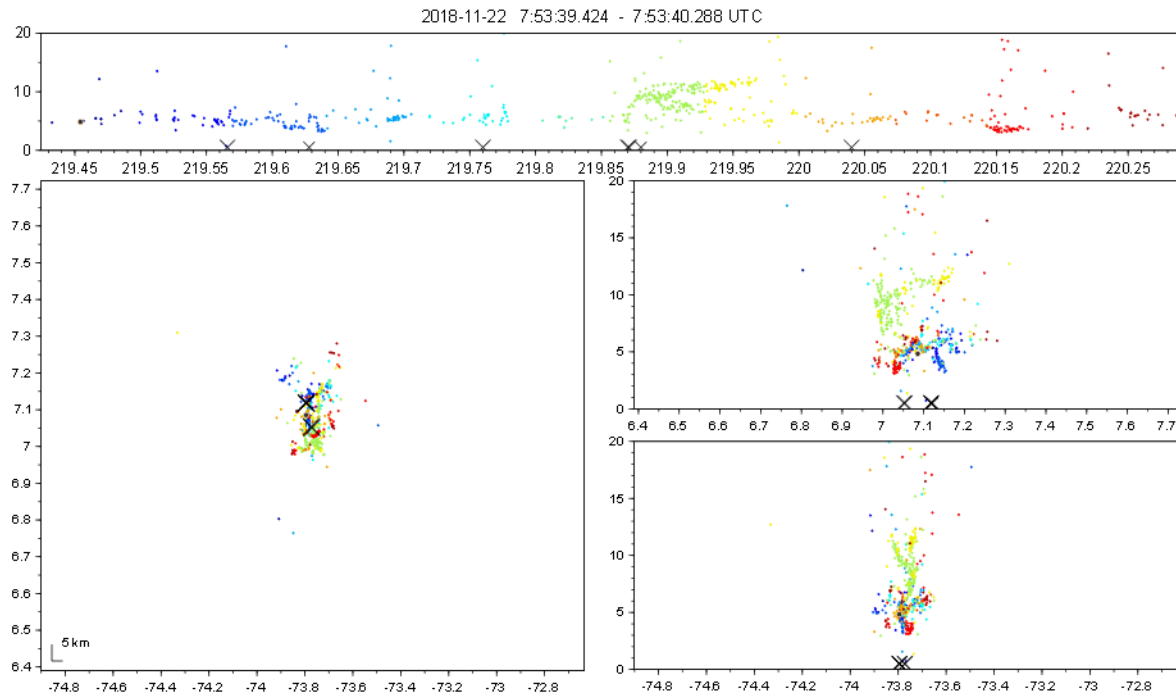
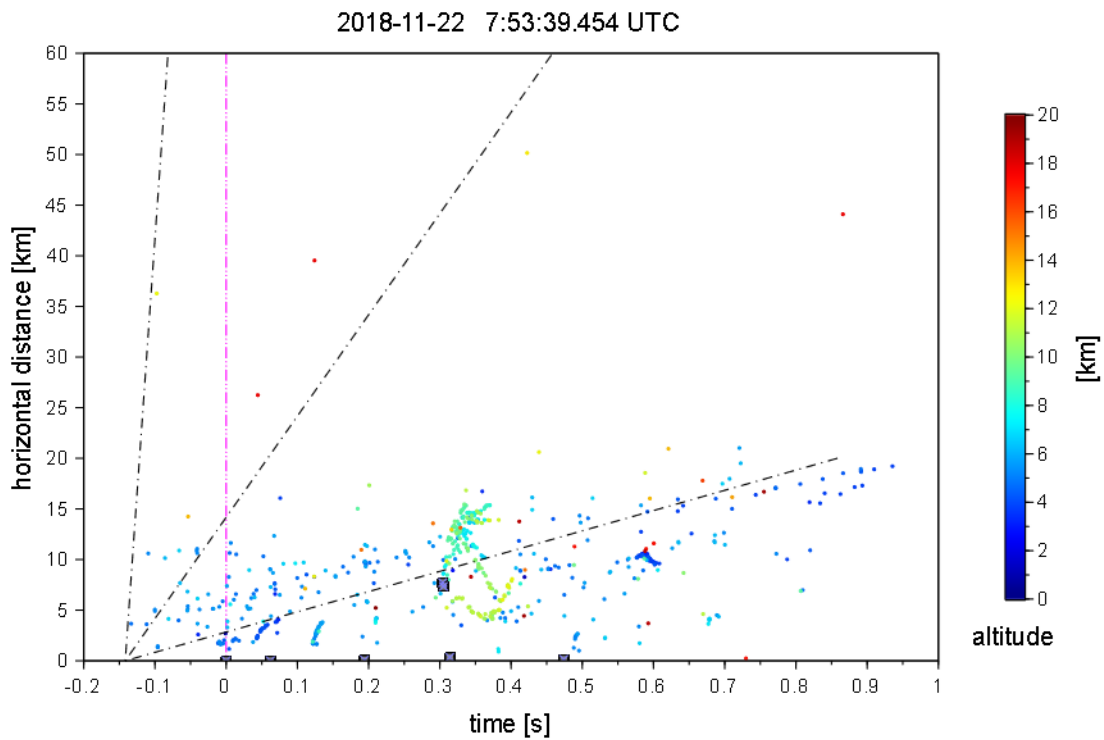


Figura 29. Evento B CG-, relación tiempo y distancia de las fuentes



El la figura 28 se observa el evento B, este ocurrió aproximadamente 10 minutos después del evento A, se generó un flash CG- con descargas subsecuentes, en la figura 29 se puede observar pequeños líderes negativos en $t=0.043$ s y $t=0.122$ s, el primero de color azul oscuro, se encuentra aproximadamente entre 3 y 4 km de altura, el segundo de color azul claro se encuentra entre 5 y 6.5 km de altura, en $t=0.302$ s se genera el impacto a la estructura No 14 (T. transmisión) con una corriente de -15.8 kA, 3 ms después se produce otro impacto, y estos 2 impactos ocurren a aproximadamente 7.5 km del resto de impactos dentro del casco urbano de Barrancabermeja, en ese mismo instante y en la misma ubicación a unos 5 km de altura inicia un líder negativo ascendente, en $t=0.328$ s y a 12.9 km del primer impacto en la figura 29 se puede ver tonalidades de azul claro y verde, estas indican una diferencia de aproximadamente 2 km, además de eso se presentan bifurcaciones, un grupo de fuentes se acerca al lugar del primer impacto y otro se aleja, la distancia máxima de estos líderes con respecto al primer impacto es de 15.33 km.

Figura 30. Mapeo evento C CG-

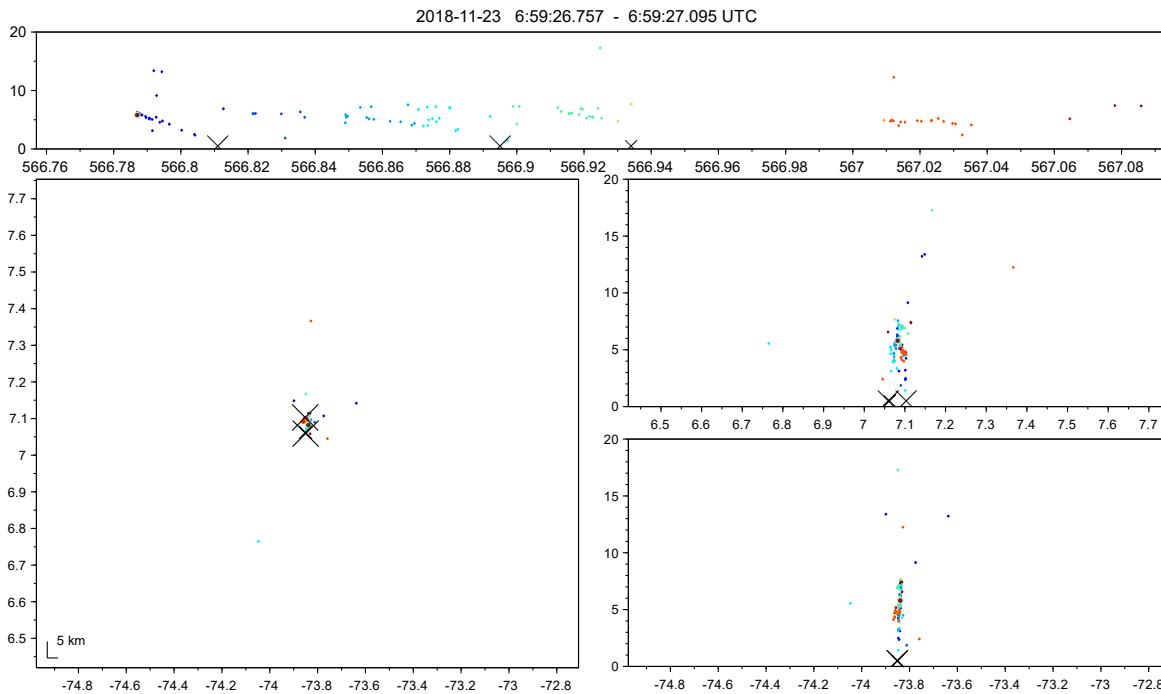
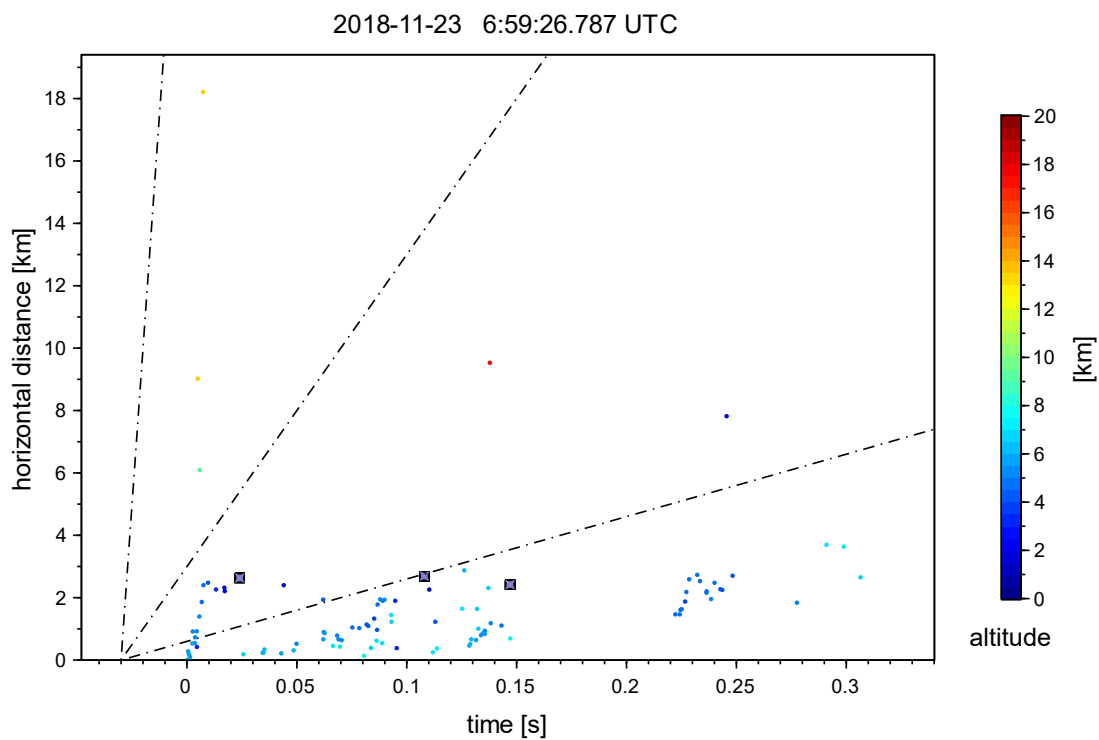


Figura 31. Evento C CG-, relación tiempo y distancia de las fuentes



En la figura 30 se observa un evento CG- con descargas subsecuentes, en la figura 31 se puede observar en $t=0$ y en el origen un líder negativo, este inicia a 5.8 km de altura y empieza a descender hasta impactar el suelo en $t=0.024$ s, este líder tiene una velocidad radial mayor a la velocidad promedio de líderes negativos, cuando llega a 2.5 km del origen y en $t=0.01$ s disminuye su velocidad e impacta el suelo a una distancia horizontal de 2.63 km del origen. En $t=0.025$ s inicia el segundo líder negativo a una altura de 6.9 km, este líder empieza a perder altura hasta que se produce el impacto en $t=0.108$ s, en la figura 31 se observa como pasa de azul claro a azul oscuro a medida que se aleja del origen, también se puede observar fuentes de azul claro después de $t=0.65$ s, presentan una diferencia clara en la tonalidad en comparación a las del líder negativo, esto indica una diferencia de altura de aproximadamente 2 km, estas fuentes son rastros de líderes positivos, son generadas por líderes retrógrados cuando se produce el proceso de reionización en los extremos del líder positivo, estas se encuentran entre 7 y 8 km de altura. El tercer líder negativo se produce en $t=0.128$ s a aproximadamente 6 km de altura, en este caso solo se puede observar fuentes hasta una altura de 4.8 km, el impacto se produce en el área compartida por las estructuras No 35, 36 y 37 dentro del casco urbano de Barrancabermeja, el cuarto líder es un líder IC- sus fuentes se encuentran entre 4 y 5.5 km de altura.

Figura 32. Mapeo evento D CG-

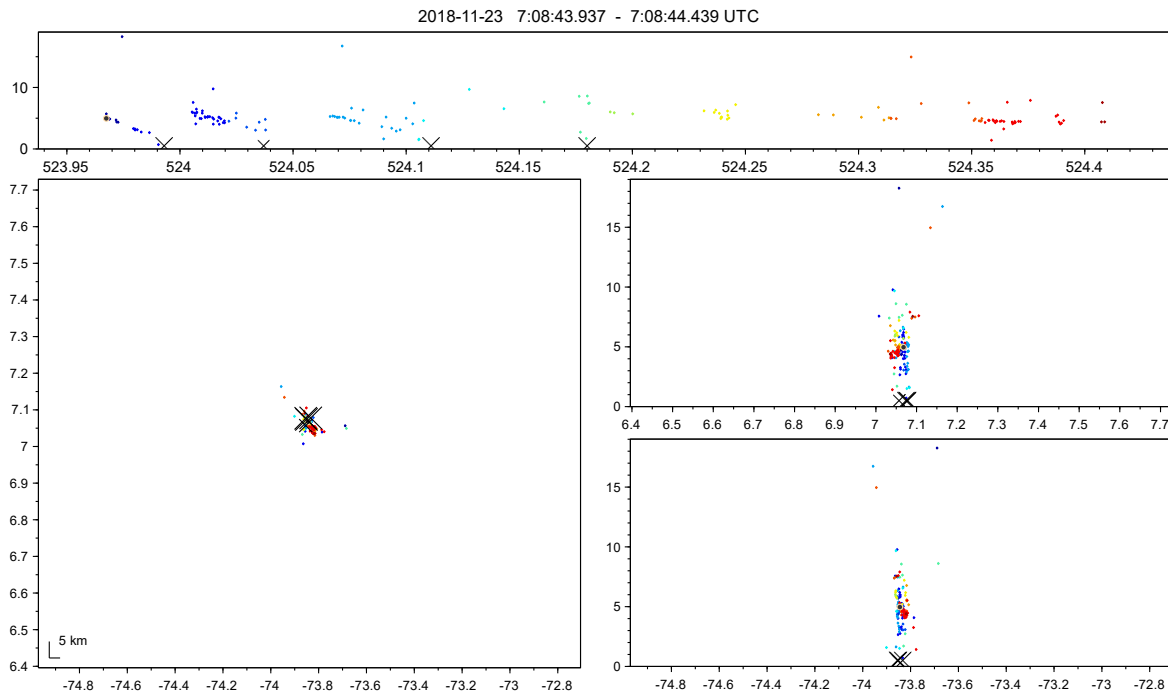
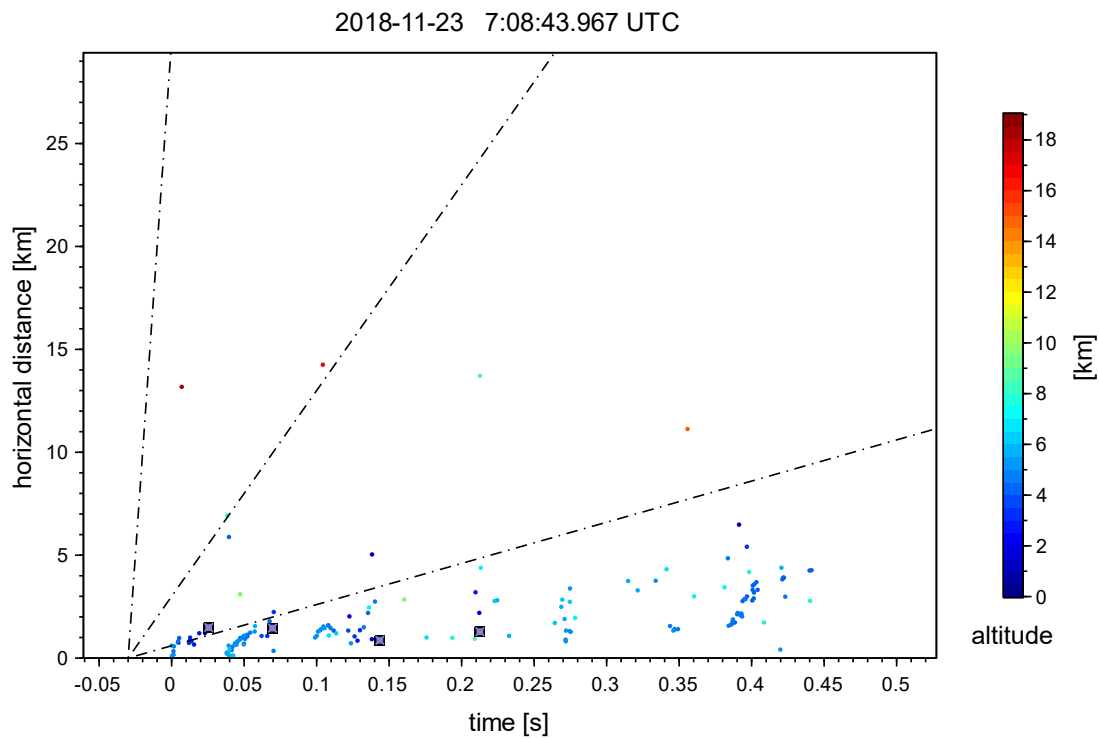


Figura 33. Evento D CG-, relación tiempo y distancia de las fuentes



En la figura 32 se observa el evento D, ocurre 9 minutos después del evento E, se puede observar una descarga CG- con descargas subsecuentes y al igual que en el evento anterior se impacta el área de captación de las estructuras No 35, 36 y 37; el origen del flash se produce a 5 km de altura, en la figura 33, en $t=0$ s se observa el primer líder negativo, este se aleja del origen hasta 1.5 km e impacta en tierra en $t=0.0255$ s, el segundo líder negativo inicia en $t=0.038$ s a aproximadamente 0.3 km del origen, a una altura de 6 km, una porción de este líder se acerca al origen, la otra se aleja hasta estar a 1.3km en $t=0.057$ s, después de este punto se encuentran menos fuentes, las más bajas están a 3 km de altura, el impacto se produce a 1.45 km del origen en $t=0.0695$ s, los otros dos impactos se producen a 0.86 y 1.282 km del origen. También se puede observar fuentes entre $t=0.25$ s y $t=0.45$ s de color azul claro que siguen el comportamiento de líderes positivos entre 6 y 8 km de altura.

Figura 34. Mapeo evento E CG-

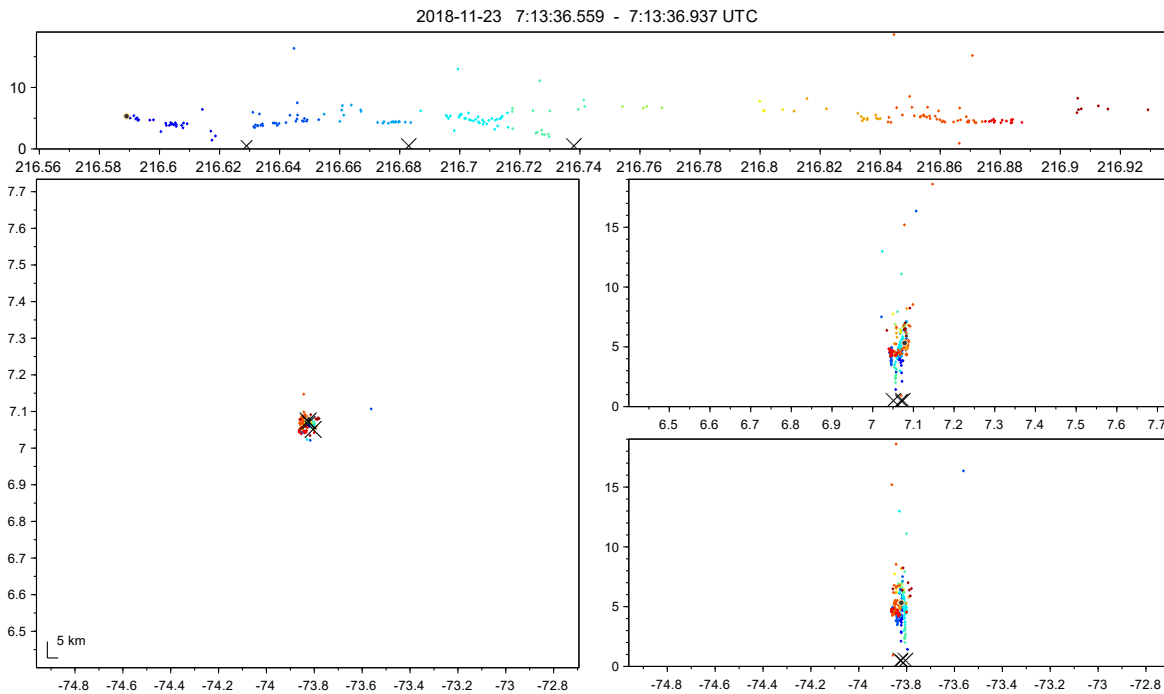
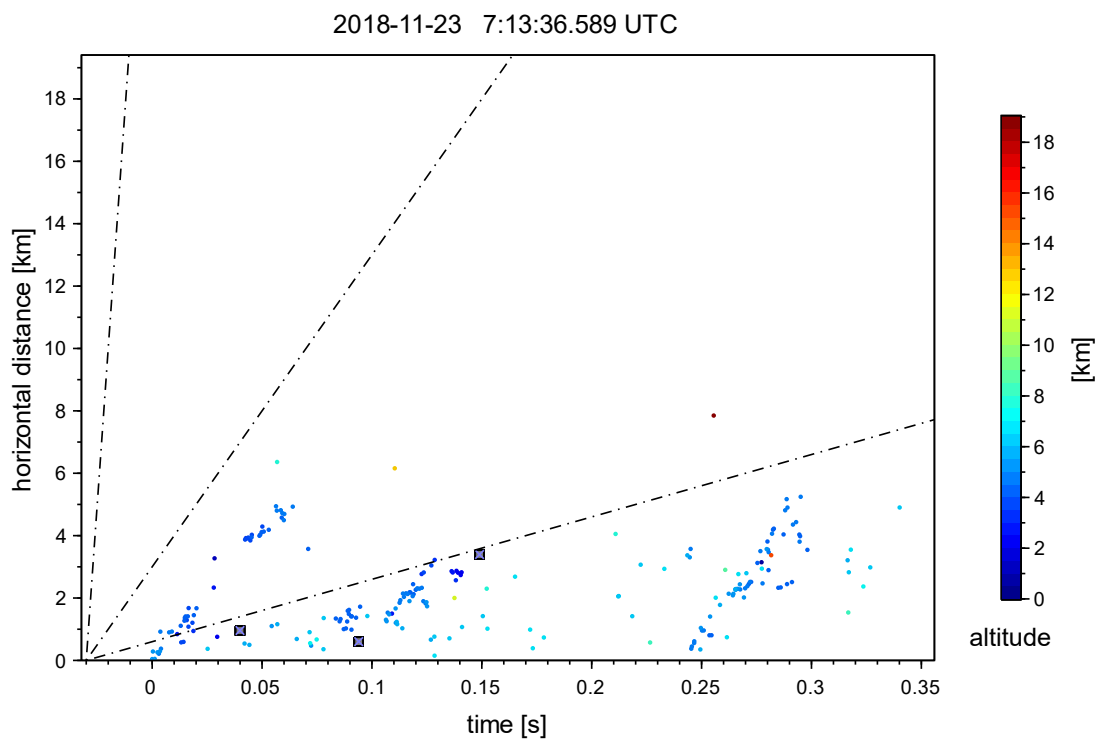


Figura 35. Evento E CG-, relación tiempo y distancia de las fuentes



En la figura 34 se observa el evento E, este es un flash CG- con descargas subsecuentes, inicia a 5.3 km de altura, en la gráfica T-D ubicada a la derecha se puede observar el primer líder negativo en $t=0$ s, se aleja hasta 1.7 km del origen y sus fuentes se encuentran entre 3.5 y 5.5 km de altura, en $t=0.0423$ s y a 3.87 km del origen se puede observar el segundo líder negativo que se aleja hasta llegar a 5 km, en $t=0.106$ s y a 1.302 km del origen se puede ver un líder negativo, sus fuentes se encuentran entre 4 y 6 km de altura, este se aleja hasta 3.22 km, en $t=0.245$ s se observa otro líder negativo, este inicia a 0.38 km del origen y se aleja hasta una distancia máxima de 5.25 km, termina en $t=0.3$ s; el primero impacto a tierra cayo en la estructura de estudio No 3 (latitud 7.069° , longitud -73.823°) con una corriente de 14.5 kA, las fuentes están en su mayoría por encima de 3.5 km de altura, las fuentes de color azul claro se encuentran a aproximadamente entre 6 y 8 km de altura(según la tonalidad) estas siguen el comportamiento de líderes positivos.

Figura 36. Mapeo evento F CG-

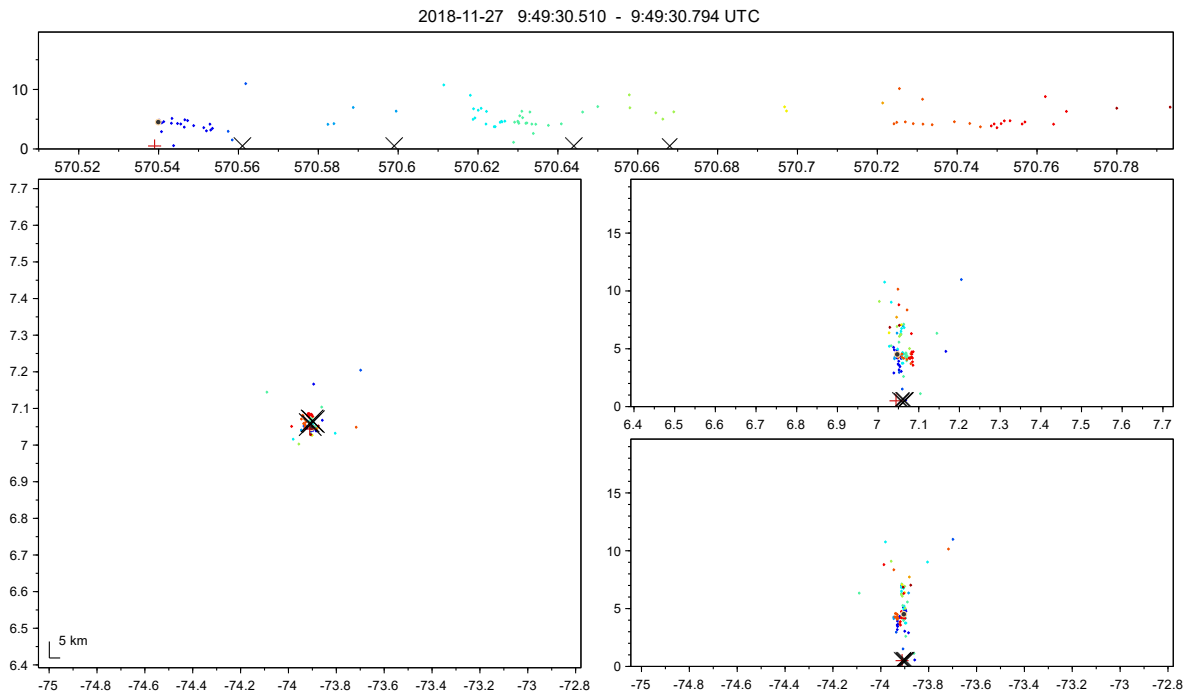
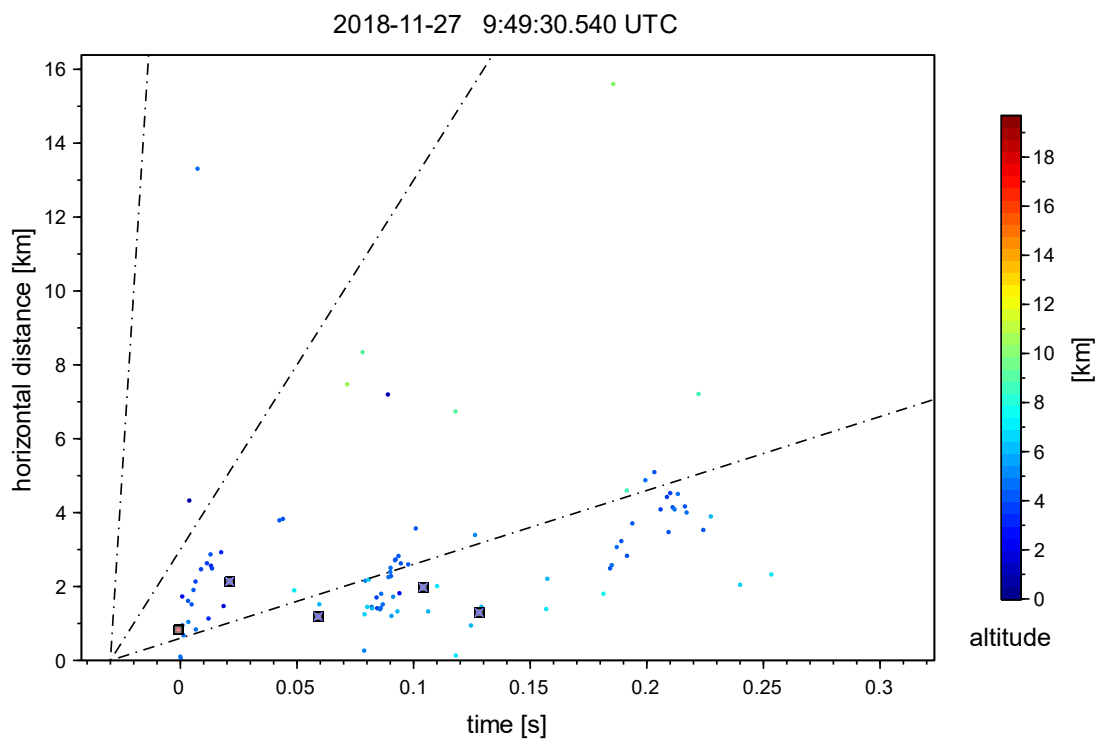


Figura 37. Evento F CG-, relación tiempo y distancia de las fuentes



En la figura 36 se observa un evento CG- con descargas subsecuentes, en la gráfica T-D ubicada en la derecha en $t=-0.001$ s se encuentra un impacto CG+ el cual puede ser generador de los siguientes impactos, el origen del flash inicia a 4.5 km de altura, en $t=0$ s a 0.41 km del origen se puede observar un líder negativo, este líder se aleja hasta estar a 2.62 km y su altura más baja registrada es de 3 km, después de $t=0.0175$ s no se encuentran más fuentes, el impacto se genera en $t=0.021$ s a 2.16 km del origen, el siguiente impacto se da en $t=0.059$ s, en $t=0.082$ s a 1.55 km del origen y a 4.2 km de altura inicia el segundo líder negativo, este se aleja hasta estar a una distancia máxima de 2.8 km, sus fuentes se encuentran entre 4 y 4.7 km de altura, el impacto a la estructura de estudio No 12 ubicada a 3.5 km del casco urbano de Barrancabermeja es el 3er impacto CG-, este se da en $t=0.104$ s y tiene una corriente de 31.8 kA. En $t=0.184$ s y a 2.491 km del origen se puede observar el 3er líder negativo, este se aleja hasta estar a 5.096 km del origen, en este caso cambia de dirección y vuelve a acercarse hasta estar a 3.5 km del origen, sus fuentes se encuentran entre 3.57 y 4.72 km de altura.

Figura 38. Mapeo evento G CG-.

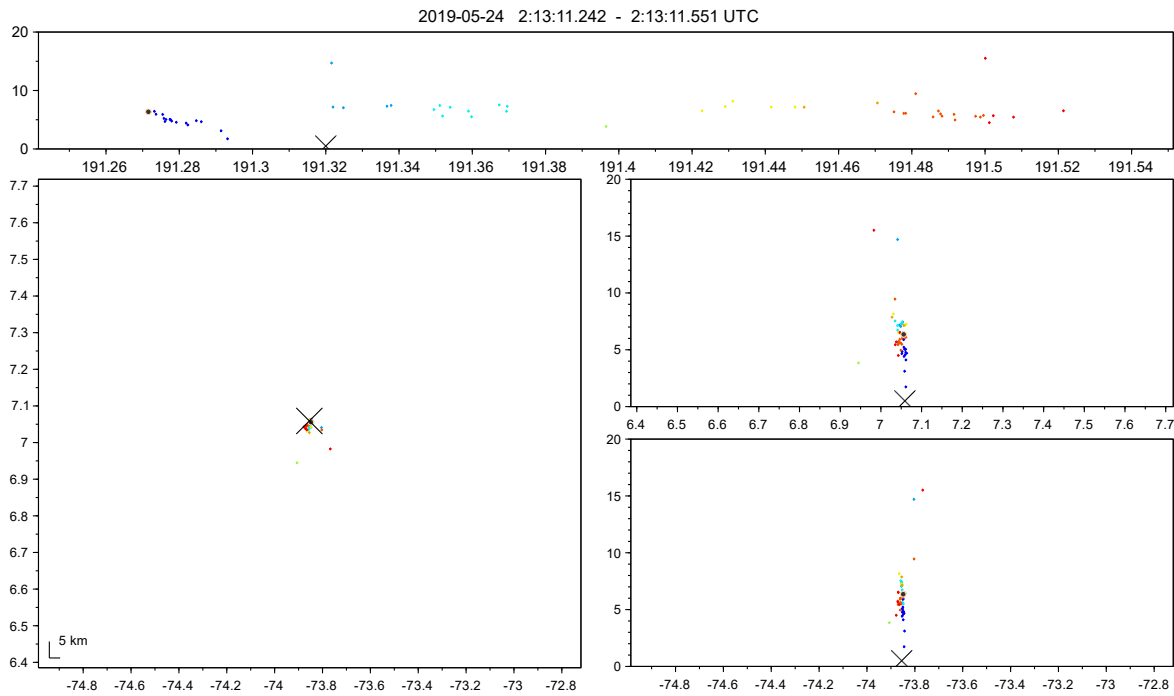
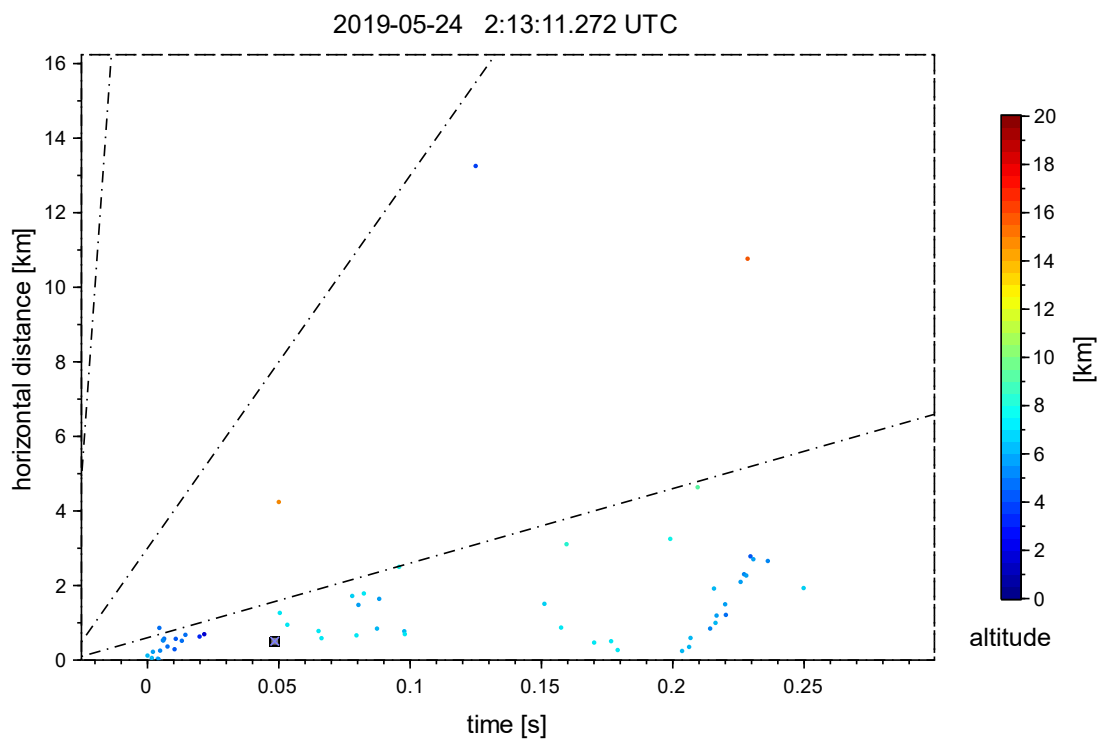


Figura 39. Evento G CG-, relación tiempo y distancia de las fuentes



En la figura 38 se observa que el origen del flash se da a 6.355 km de altura, en la figura 39 se puede observar un impacto CG- en $t=0.048$ s a 0.505 km del origen del rayo, este implica las estructuras No 35, 36 y 37, después de este se ven fuentes de color azul claro dispersas, son rastros de líderes retrógrados que indican la posición de los líderes positivos, su altura varía entre 5.5 y 7.5 km, en $t=0.204$ s a 0.2 km del origen y a 6.5 km de altura inicia un líder negativo, este descendiendo hasta alcanzar 4.5 km y se aleja hasta estar a 2.78 km del origen.

Figura 40. Mapeo evento H CG-

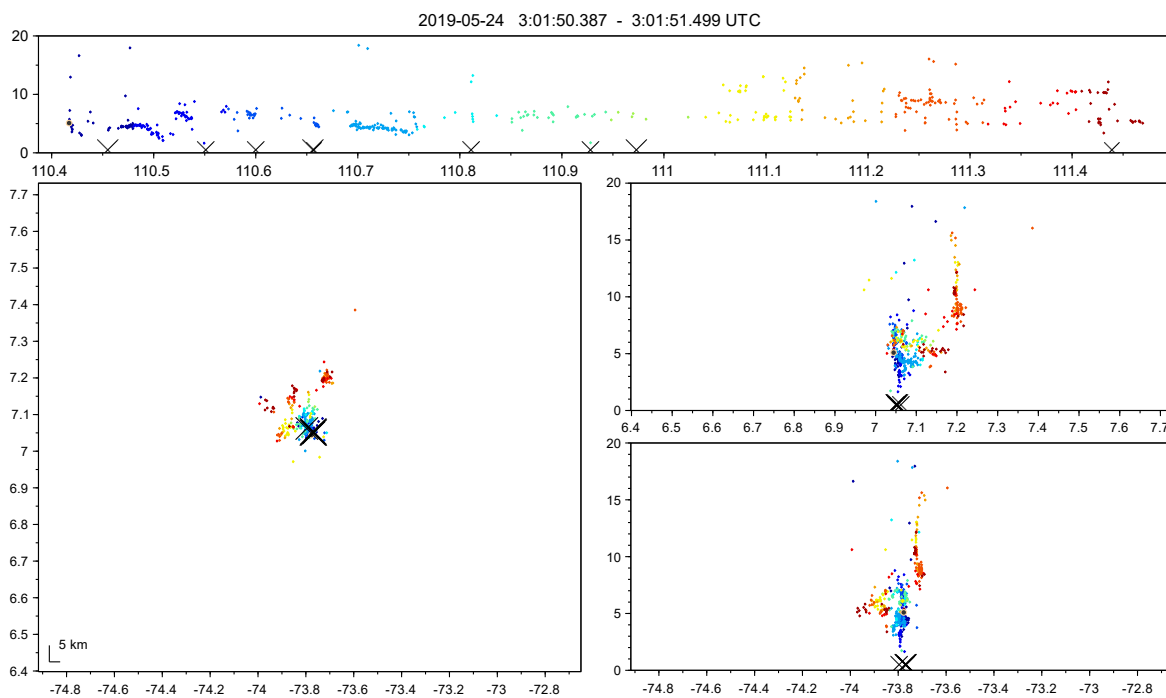
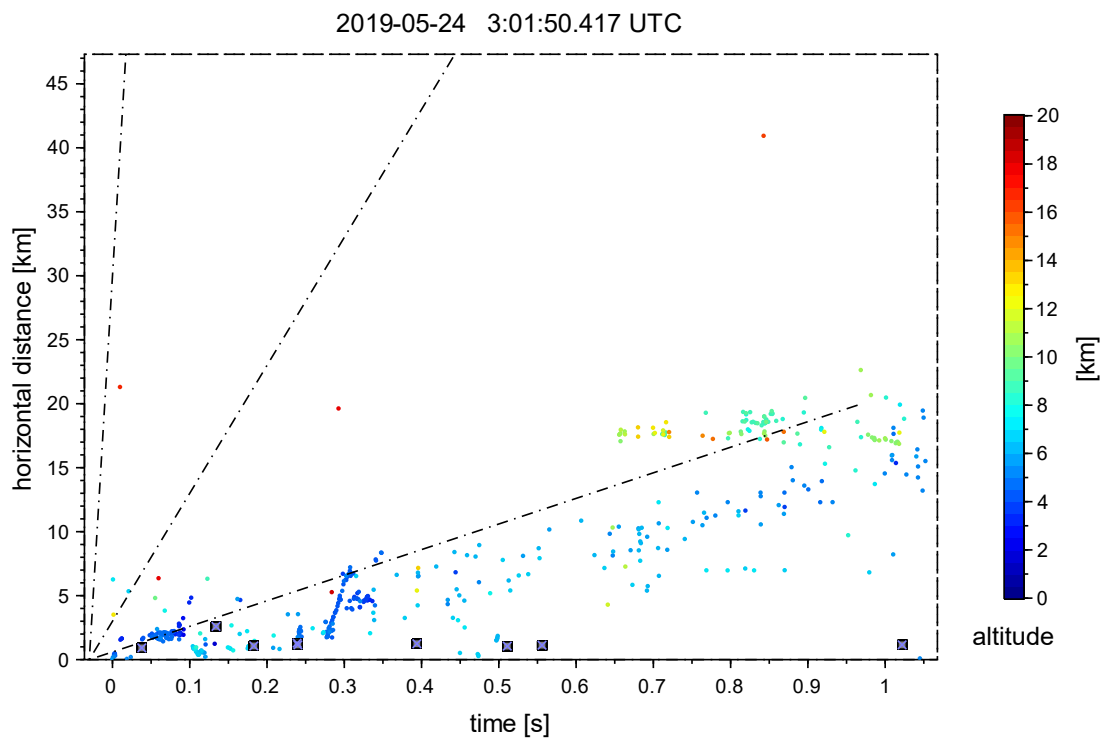


Figura 41. Evento H CG-, relación tiempo y distancia de las fuentes



En la figura 40 se observa un evento con descargas subsecuentes, el origen del flash se da a 5.1 km de altura, en $t=0.038$ s se genera el impacto a la estructura No 14 ubicada a 6 km del casco urbano de Barrancabermeja, después de este impacto se puede observar una agrupación de fuentes, si se selecciona el segundo impacto en la figura 41 como el punto de referencia se puede ver que se trata de un líder negativo. Entre $t=0.134$ s y $t=0.24$ s se observan 4 impactos más a una distancia entre 1.153 y 2.595 km del origen, en $t=0.277$ s y 1.75 km del origen inicia un líder negativo que presenta una velocidad mayor a la promedio de líderes negativos, este se aleja hasta estar a 7.218 km del origen en $t=0.308$ s, sus fuentes se encuentran entre 3.1 y 5.2 km de altura, después de este líder se observan otros 3 eventos CG-, ocurren entre 1.13 y 1.244 km del origen, se puede ver fuentes de color azul claro que siguen el comportamiento de líderes positivos, estas se encuentran 4.8 y 7.3 km de altura.

Realizando un estudio de estadística descriptiva básica para los eventos GC se observó que el 76% de los eventos CG- se caracterizan por componerse de líderes negativos que tienen una extensión horizontal menor a 7 km desde su punto de origen (Figura 42), pero, que a su vez existen eventos con extensiones mayores. el evento H con una extensión de 7.2 km, o el caso donde valores mayores como el evento B con una extensión de 12.08 km. Para determinar los valores promedios más cercanos no se tuvieron en cuenta dichos valores excepcionales (Tabla 8).

Figura 42. Histograma de distancia horizontal del líder a su origen

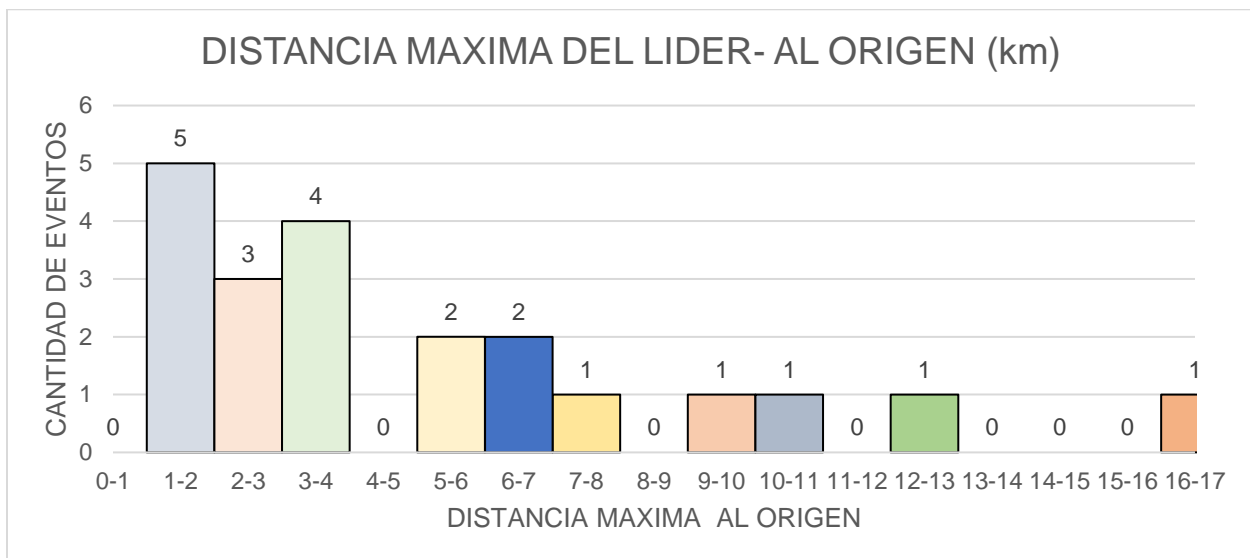


Tabla 8. Valores estadísticos para los eventos GC-.

CG-	DISTANCIA MAXIMA AL ORIGEN (km)	ORIGEN (km) altura	ALTURA DE LA FUENTE MAS BAJA REGISTRADA	CORRIENTE PICO (kA)
PROMEDIO	5.2	5.5	2	-25.8
MEDIANA	3.7	5.2	1.6	-20.3
DESVIACION	4	0.9	1.3	16.7

4.2.2.2. Eventos CG+

A continuación, serán presentados los resultados gráficos para cada evento GC+ seleccionado.

Tabla 9. Lista de los eventos GC+ a las estructuras seleccionadas junto con sus principales atributos.

Eventos	A	B	C	D	E
Dmax líder al origen	14	31	3.9	27.2	23.4
Origen (km) altura	5.6	10.1	5.7	7.2	4.9
Corriente (kA)	12.4	47.3	10.1	15	10.8
Dmax CG+ (km) al origen	18.9	11	4.7	5	11.6
No de impactos	1	1	1	1	1
Duración (seg)	0.3	0.8	0.4	0.5	1.4
Estructura No	14-15-16	3	1	9-10	11-12-13

Figura 43. Mapeo evento A CG+

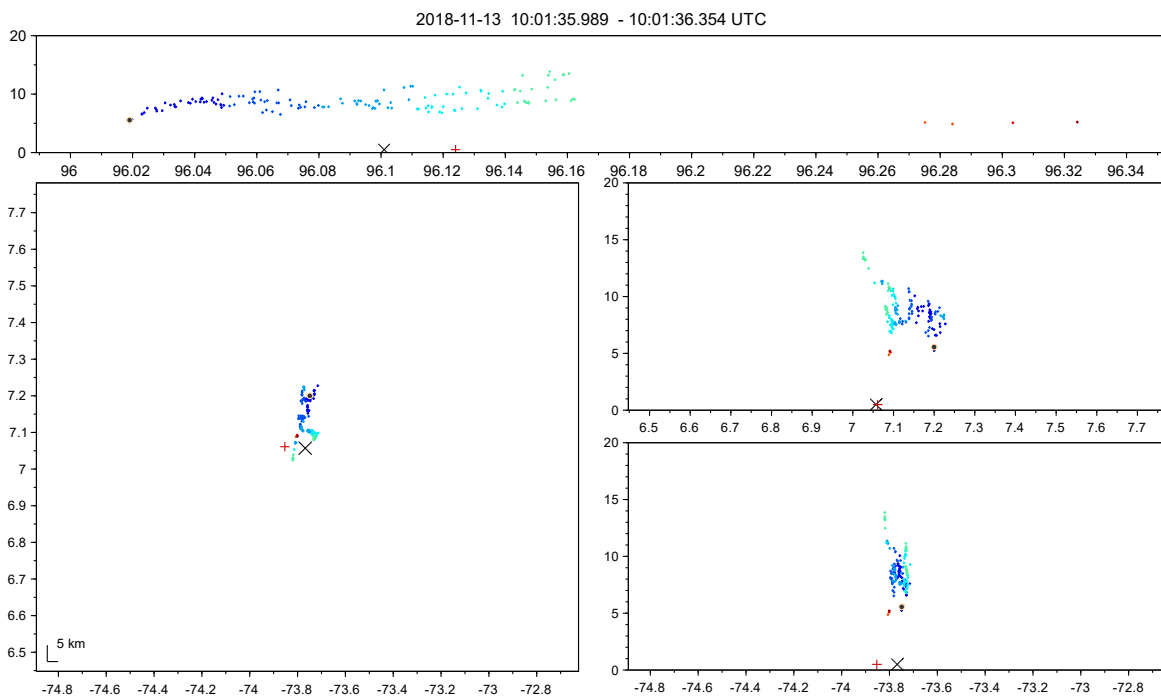
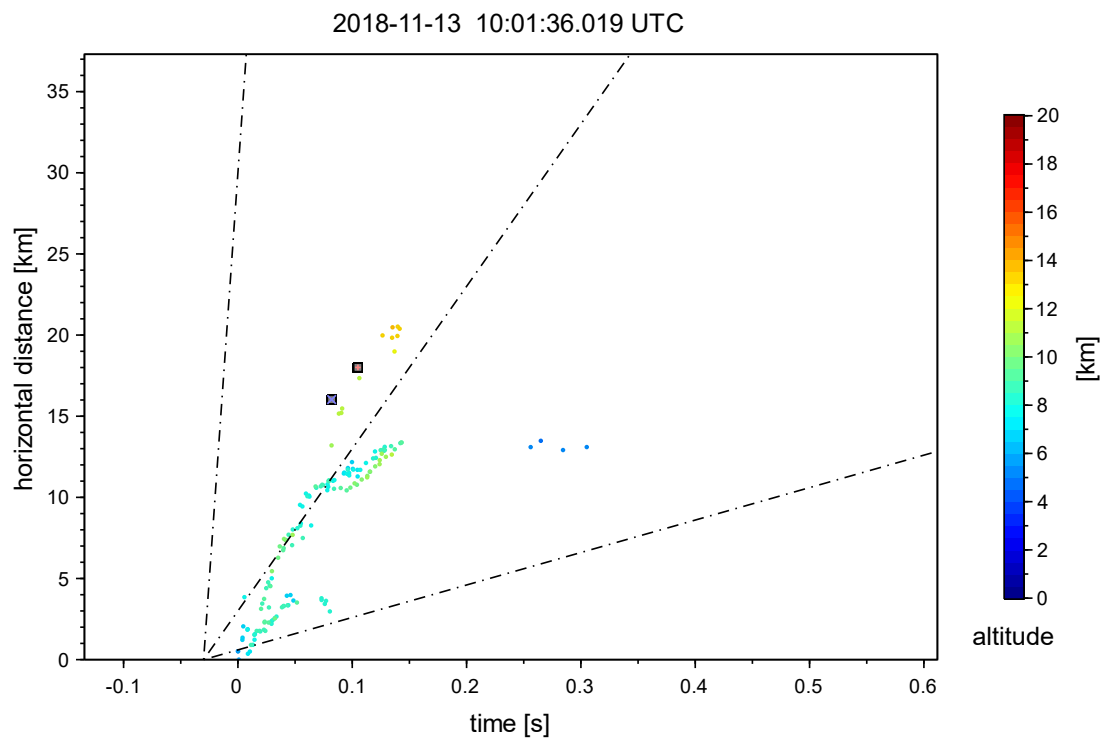


Figura 44. Evento A CG+, relación tiempo y distancia de las fuentes

En la figura 43 se observa un que flash inicia a 5.5 km de altura, en la figura 44 se puede ver que es un líder negativo, presenta una pendiente mayor a la de velocidad radial característica de líderes negativos ($1 \cdot 10^5$ m/s), al inicio del flash se puede observar fuentes de color azul claro, a medida que el líder se aleja del origen estas fuentes cambia a un tono verde, esto indica un aumento en la altura del líder, cuando el líder se encuentra a aproximadamente 8 km del origen en $t=0.4$ las fuentes vuelven a pasar de color verde a azul claro, esto indica una disminución en altura, se aleja hasta estar a 13.7 km del origen en $t=0.144$ s. El flash CG+ puede ser ascendente provocado por el líder negativo que se observa en el visor del LMA, en este caso no se encuentran fuentes que provengan de las estructuras de estudio.

Figura 45. Mapeo evento B CG+

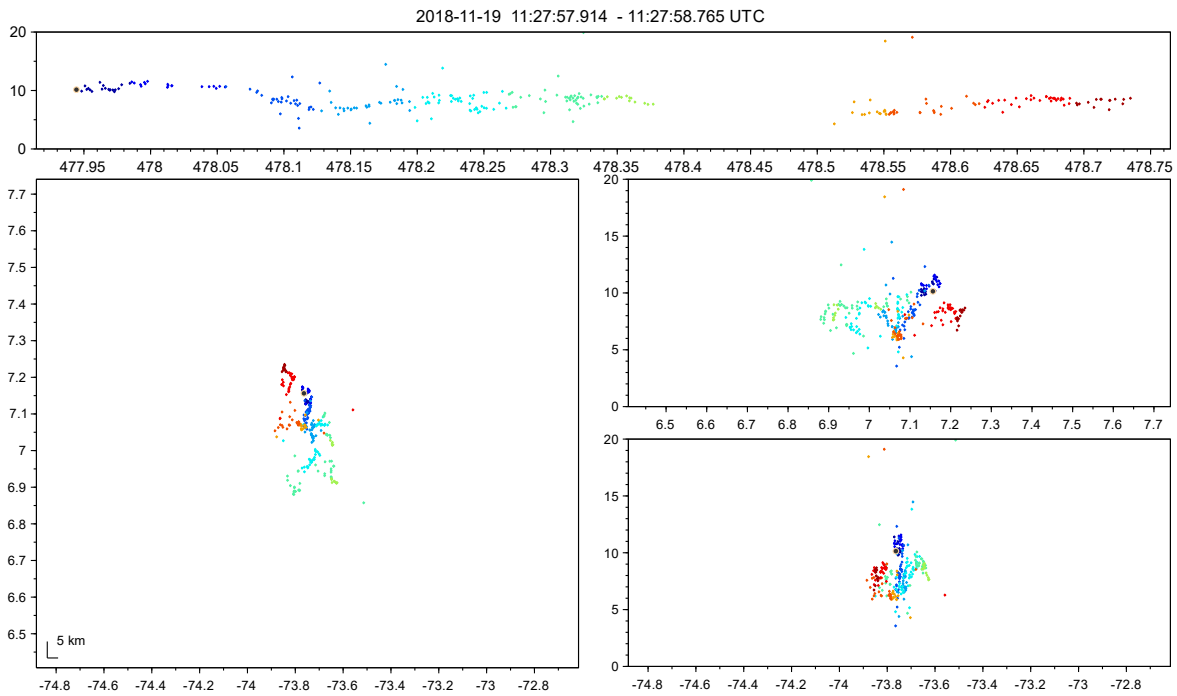
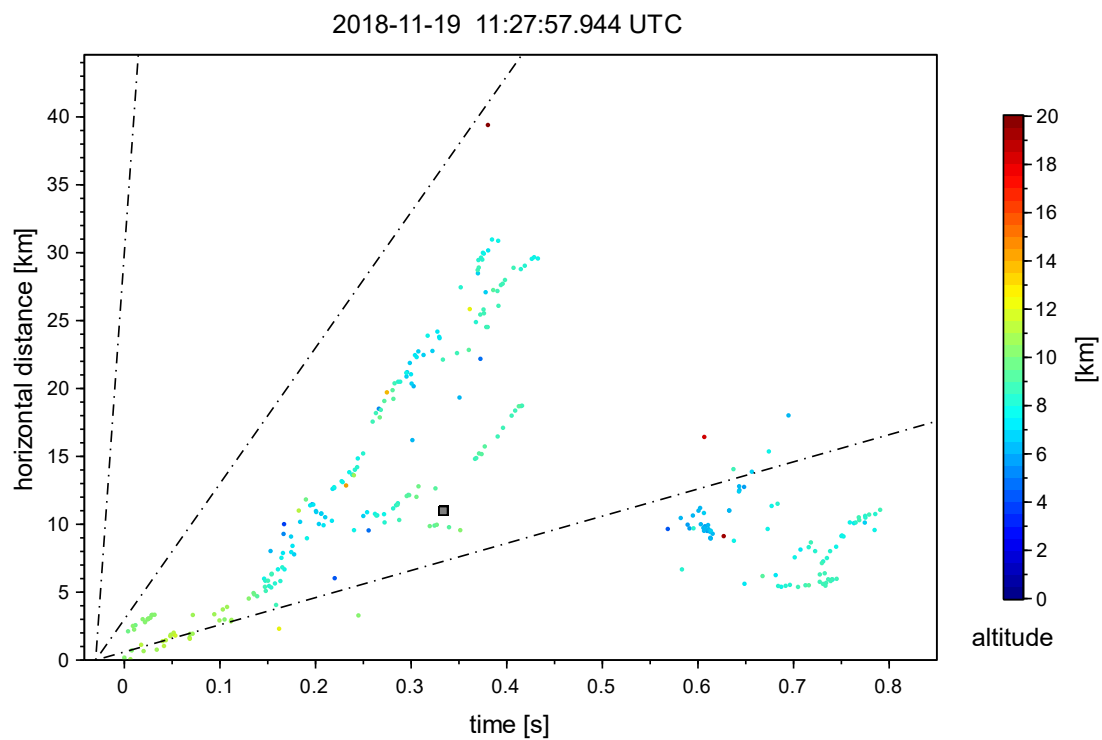


Figura 46. Evento B CG+, relación tiempo y distancia de las fuentes



En la figura 45 no se ve el impacto, este ocurre durante un flash IC+, en la figura 46 se puede observar un líder negativo, este inicia a aproximadamente 10 km de altura, a medida que se aleja de su origen comienza a perder altura, sus fuentes cambian de color verde a azul claro, esto indica una disminución de aproximadamente 2 km, en $t=0.2$ y cuando sus fuentes se encuentran entre 10 y 11 km del origen este se ramifica, una de estas sigue alejándose con la misma velocidad, sus fuentes oscilan entre azul claro y verde, esto quiere decir que se encuentran aproximadamente entre 8 y 10 km de altura, la otra ramificación ve una pequeña disminución en su velocidad, cerca de esta es que ocurre el impacto CG+ a la estructura No 3. La distancia máxima del líder al punto de origen es de 31 km, sus fuentes se encuentran entre 6 y 11.6 km de altura.

Figura 47. Mapeo evento C CG+

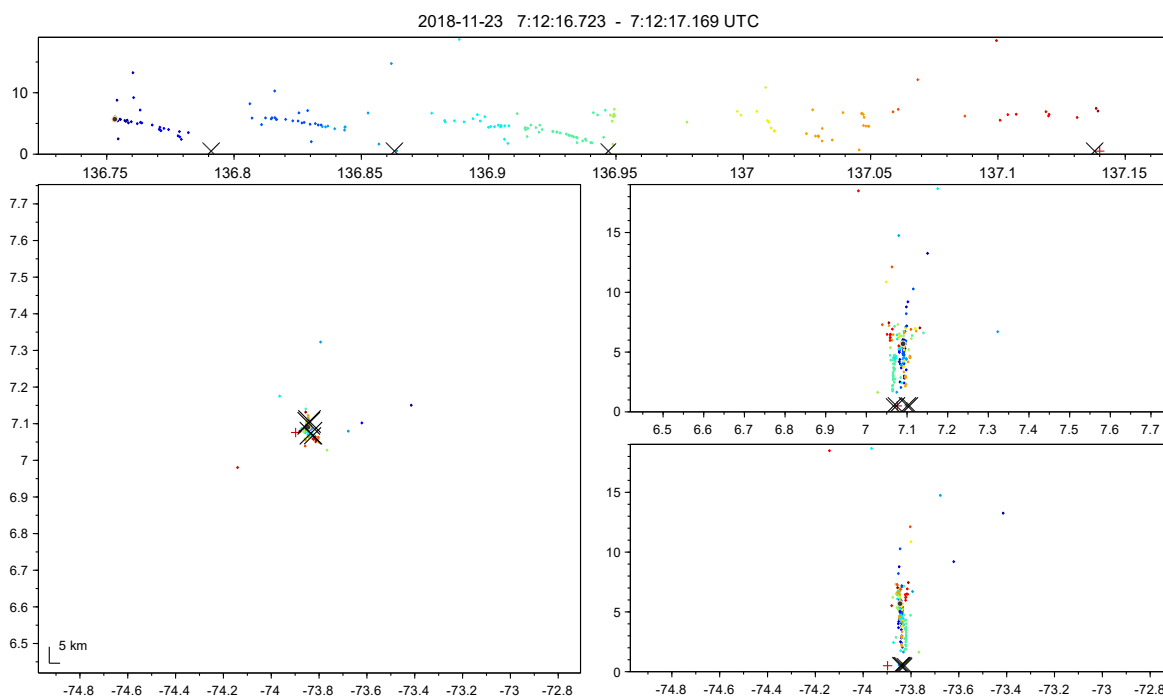
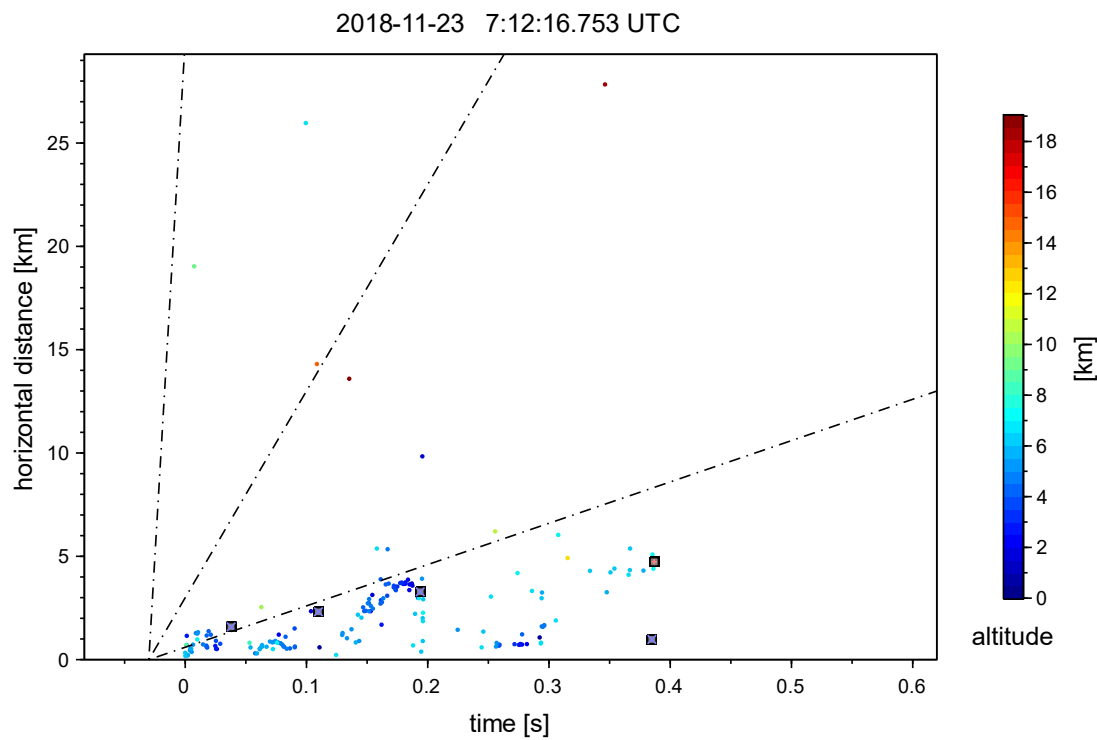


Figura 48. Evento C CG+, relación tiempo y distancia de las fuentes



En la figura 47 se observa el origen del rayo a 6 km de altura, este presenta 5 impactos a tierra, de los cuales 4 son negativos y el ultimo es positivo, en la figura 48 se puede observar 3 líderes negativos, el primero y el segundo líder inician en $t=0$ y $t=0.05$ a aproximadamente 6 km de altura, entre $t=0.12$ y $t=0.194$ inicia a 6.7 km de altura un líder negativo que desciende hasta que impacta el suelo, la fuente más baja que se encuentra de este líder está a 1.64 km de altura, al final de rayo se puede observar lo que parece fuentes de líderes retrógrados entre 0.18 y 0.39 seg, son puntos de color azul claro (6-8 km de altura) que muestran una pendiente aproximada a la de líderes positivos, el impacto a la estructura No 1 es un evento CG+, pero en la vista de planta no se observan fuentes asociadas a este evento, este ocurre a 4.7 km del origen del rayo.

Figura 49. Mapeo evento D CG+

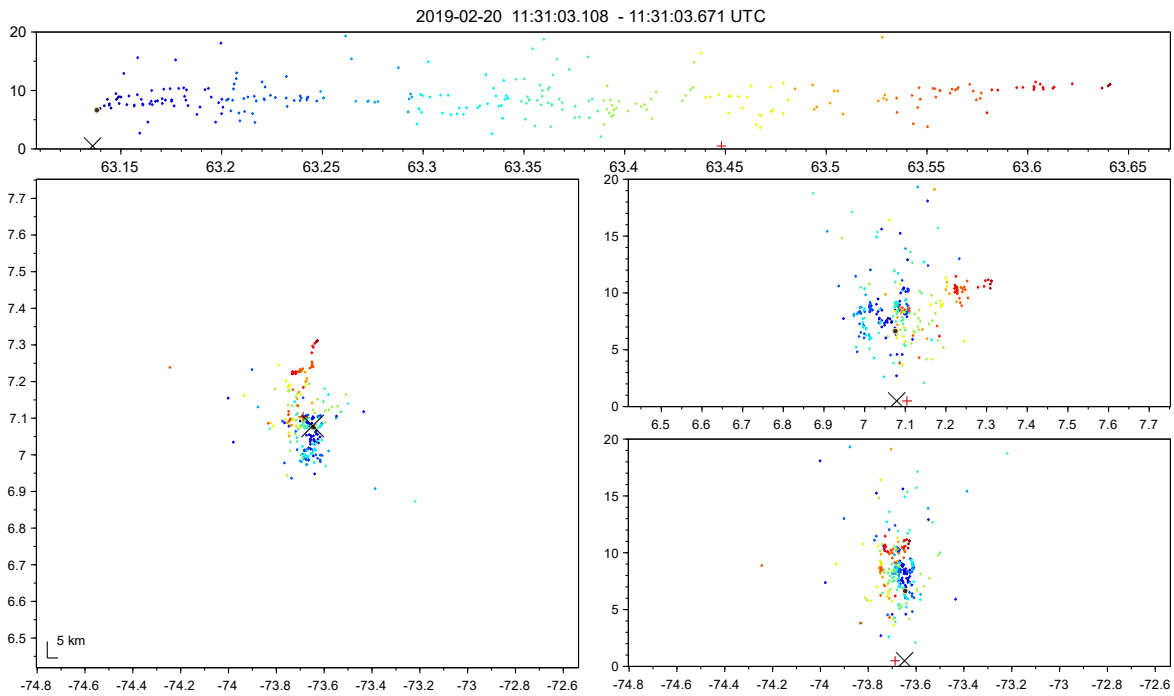
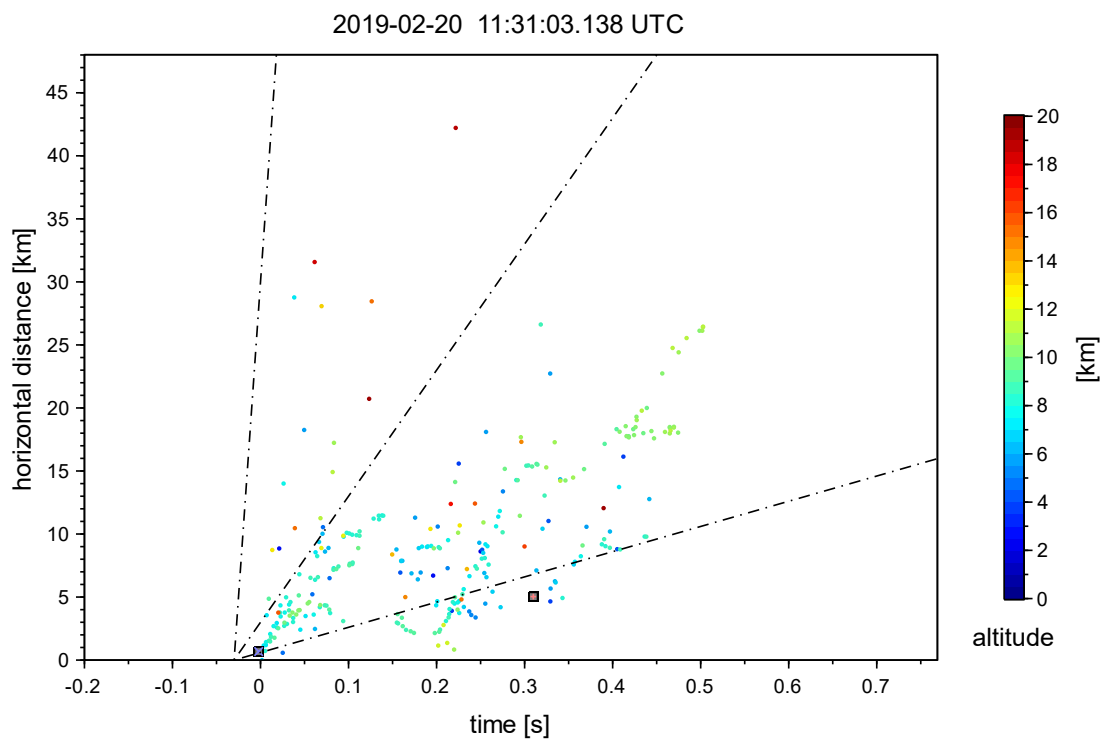


Figura 50. Evento D CG+, relación tiempo y distancia de las fuentes



En la figura 49 se observa el origen del flash a aproximadamente 7.2 km de altura, este ocurre 4 ms después de un impacto CG-, en la figura 50 se puede ver como un líder negativo inicia desde el origen aproximadamente en $t=0$ s, este se aleja y aumenta su altura, se ve un cambio de tonalidad de amarillo (7 km) a color naranja (8.5-9 km) y color rojo(10-11 km), esto ocurre cuando el líder está a 2.5 km del origen, en $t=0.06$ s y a 6 km del origen el líder se bifurca, un extremo se acerca al origen se observan fuentes hasta $t=0.08$ s y a 4.4 km del origen, el otro extremo se aleja hasta llegar a 7.3 km del origen en $t=0.103$ s. El siguiente líder negativo inicia en $t=0.2$ s a aproximadamente 3 km del origen a 9 km de altura, este pierde altura ya que sus fuentes pasan de color naranja a amarillo y en algunos casos color verde, este líder se aleja hasta estar a 10.2 km de origen en $t=0.254$, el tercer líder negativo inicia en $t=0.389$ a 18.1 km del origen, sus fuentes se encuentran entre 9.9 y 11.2 km de altura, este líder se aleja hasta 27.2 km del origen y termina en $t=0.5$. el impacto a las estructuras de estudio No 9 y 10 es un evento CG+, en este caso debe de ser producto de un líder positivo que alcanza el suelo.

Figura 51. Mapeo evento E CG+

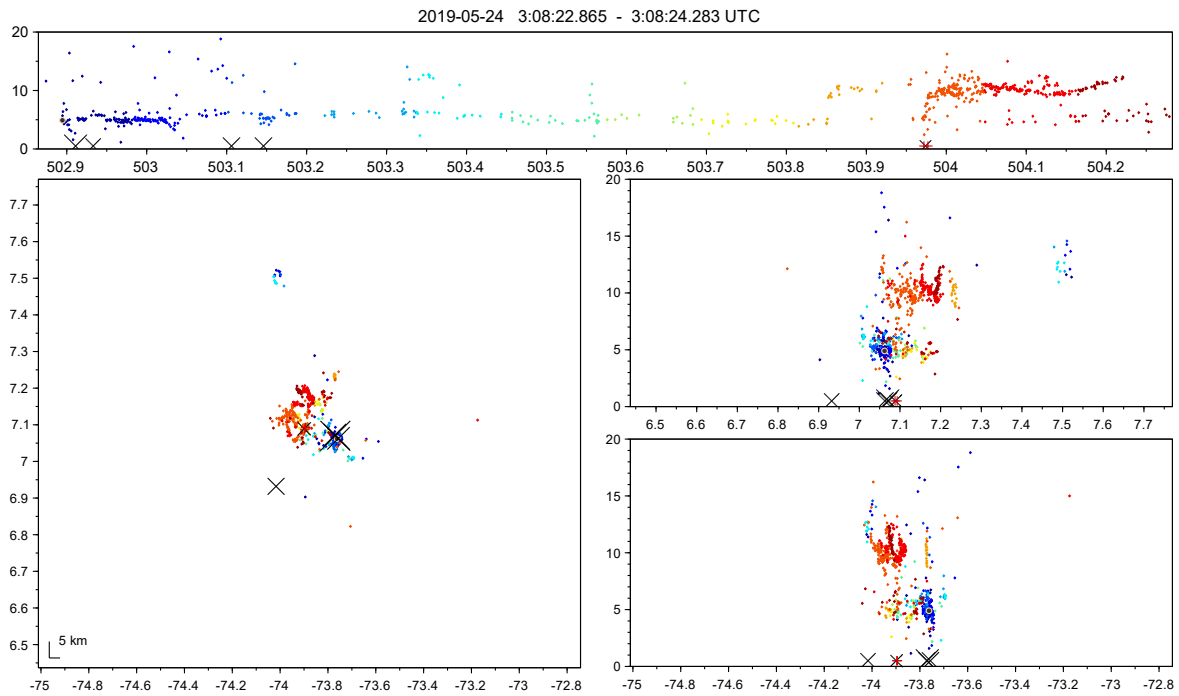
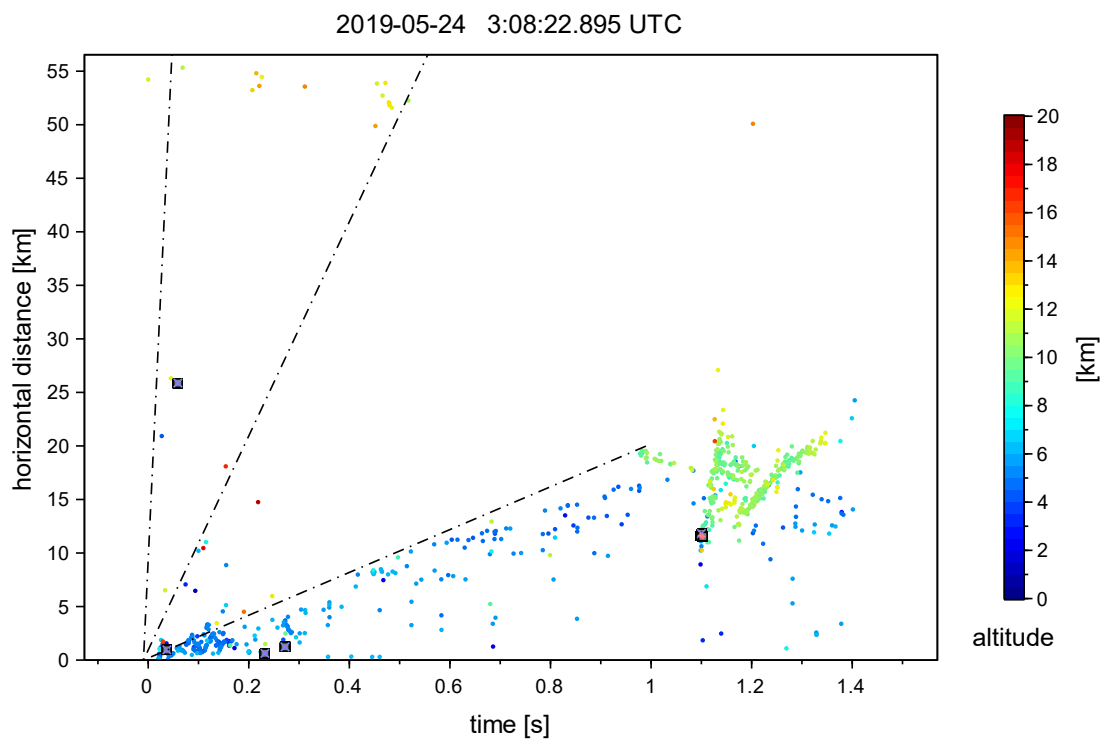


Figura 52. Evento E CG+, relación tiempo y distancia de las fuentes



En la figura 52 se puede ver una agrupación de fuentes durante los primeros 0.14 s, estas tienen una tonalidad azul, indicando una altura aproximada de entre 4 km y 6 km, si se acerca la imagen se ve que estas fuentes son líderes negativos que inician en el origen del flash y se mueven a una velocidad radial con respecto a este de 1×10^5 m/s, alejándose hasta 3.3 km. Entre $t=0$ s y $t=0.3$ s ocurrieron 4 eventos CG-, de los cuales uno se encuentra a aproximadamente 26 km del origen, no se observó fuentes cercanas a este evento, los otros 3 impactos CG- ocurren a una distancia de entre 0.5 y 1.34 km con respecto al origen, en $t=0.25$ s se observa otro líder negativo a 3.67 km del origen, este puede haberse originado debido a un líder retrogrado que reionizó una rama de un líder positivo. Entre $t=0.328$ y $t=0.957$ se puede observar algunas fuentes que siguen el comportamiento de líderes positivos, en $t=1.077$ s, $t=1.079$ s y $t=1.082$ s ocurren 3 eventos de los cuales el primero y el último fueron CG+, el segundo fue CG-, en un intervalo de tiempo de 5 ms, y a una distancia menor a 300 m según la figura 52. Antes de estos eventos CG se puede observar fuentes de líder negativo que inicia a 5.22 km de altura y ascienden hasta estar entre 10 y 12 km, este líder se aleja hasta estar a 22.1 km del origen y presenta ramificaciones.

Los eventos CG+ analizados se caracterizaron por tener un mayor crecimiento horizontal con respecto al punto de origen en comparación con los eventos GC-, se pasó de tener un promedio de 5.23 km a 19.88 km, en el caso del evento B se observa una extensión máxima de 31 km, así mismo los impactos CG se produjeron a mayor distancia, el promedio aumento de 4.33 km a 10. km.

Tabla 10. Valores estadísticos para los eventos GC+.

CG+	Distancia Máxima Al Origen (km)	ORIGEN (km) Altura	Corriente Pico (Ka)	Dmax CG+ (Km) Al Origen	No de Impactos	Duración (Seg)
PROMEDIO	19.9	6.7	19.1	10.3	1	0.7
MEDIANA	23.4	5.7	12.4	11	1	0.5
DESVIACION	10.9	2.1	15.9	5.8	0	0.4

4.3. Análisis de riesgo y comparación de las normas

De acuerdo con la metodología utilizada, la tabla 11 muestra el cálculo de alturas, área de captación y factor de localización de las estructuras objeto de estudio.

Tabla 11. Cálculo de alturas y áreas de captación de las estructuras objeto de estudio.

ESTRUCTURA	ALTURA (m)	AREA DE CAPTACIÓN (km ²)	ESTRUCTURA	ALTURA (m)	AREA DE CAPTACIÓN (km ²)
1	74	0.17	22	74	0.16
2	50	0.08	23	40	0.05
3	40	0.05	24	27	0.04
4	33	0.03	25	35.1	0.04
5	55	0.09	26	16.2	0.01
6	50	0.07	27	13.5	0.01
7	50	0.07	28	47	0.07
8	30	0.03	29	68	0.14
9	33	0.03	30	50	0.07
10	30	0.03	31	50	0.08
11	50	0.07	32	113	0.38
12	40	0.05	33	46	0.06
13	40	0.05	34	45	0.06
14	28	0.02	35	27	0.03
15	40	0.05	36	37.8	0.05
16	32.4	0.04	37	16.2	0.01
17	37.8	0.05	38	37.8	0.06
18	21.6	0.02	39	32.4	0.04
19	24.3	0.02	40	67.5	0.17
20	16.2	0.01	41	40.5	0.07
21	37.8	0.05	42	27	0.03

Posteriormente se llevó a cabo el cálculo del número de eventos peligrosos, para este se optó por utilizar un $C_d=1$ ya que estas estructuras presentaban alturas muy superiores a las estructuras cercanas. En los casos que se usó el valor de $C_d=2$ correspondían a dos estructuras que se encontraban en terrenos elevados (estructura 14 y 29) (Figura 53). En la Figura 55 se pueden observar los valores arrojados para N_d cabe resaltar que para las normas IEC-62305 y la NTC-4552 el valor de DDT es igual para todas las estructuras, debido a que se calcula con base al nivel cerámico; la norma IEC61400-24 usa los datos de DDT (Figura 54), los cuales fueron tomados del estudio realizado sobre la actividad de rayos en el departamento de Santander entre los años 2014 y 2016 (Ardila Murillo et al., 2022).

Figura 53. Medición del perfil de elevación.

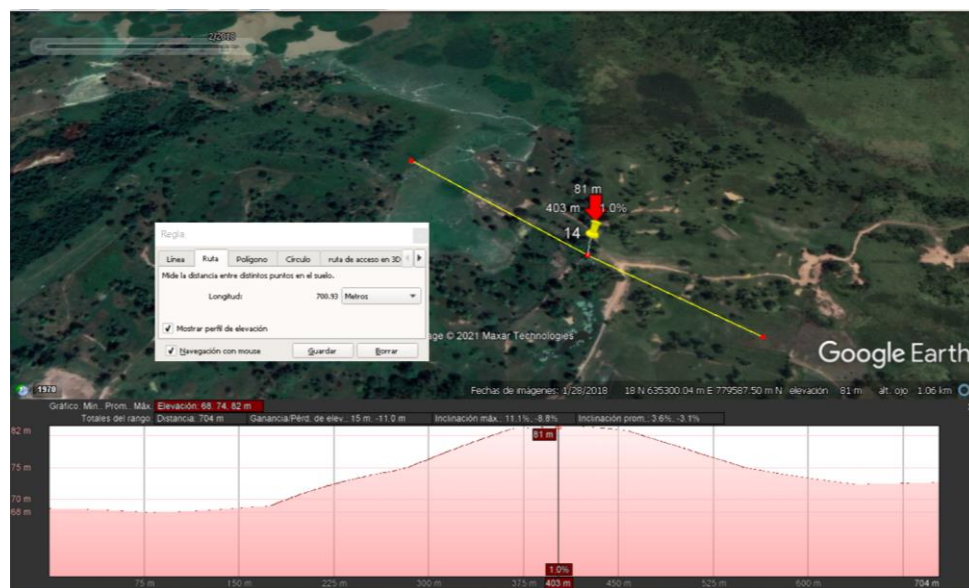


Figura 54. Mapa de la densidad de descargas a tierra del departamento de Santander, tomada de (Ardila Murillo et al., 2022)

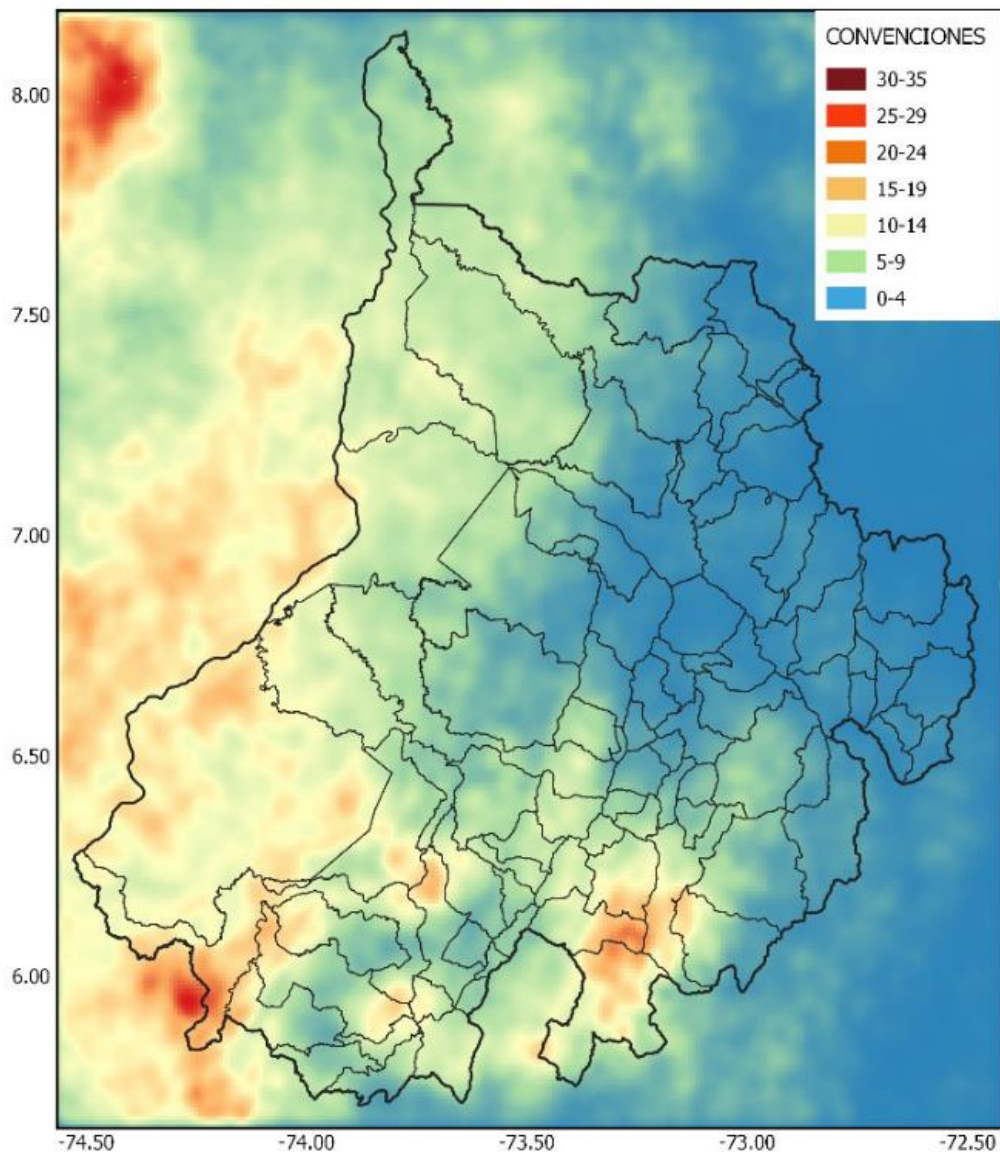
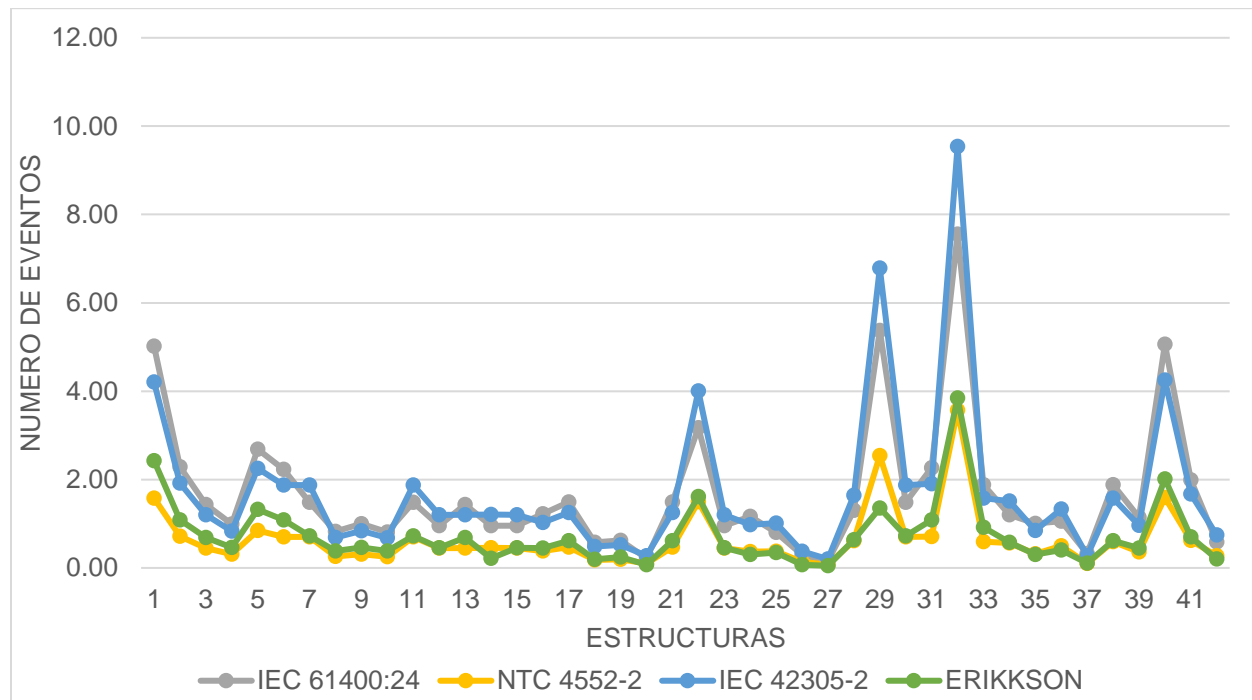


Figura 55. Numero de eventos usando las diversas fórmulas propuestas por las normas IEC-62305 (DDT=25), NTC-4552 (DDT=9.359) e IEC61400-24.



Luego de estos cálculos se procedió a realizar una comparación entre los valores propuestos por cada una de las normas y los flashes reales medidos por el sistema LMA, debido a su cercanía y a la superposición de su área colectora se agruparon algunas de las estructuras, para simplificar el proceso en vez de realizar un nuevo cálculo se procedió a sumar la probabilidad individual de cada estructura, adicionalmente se calculó la probabilidad de eventos peligrosos a estructuras elevadas utilizando la ecuación desarrollada en (Eriksson, 1987). En la **tabla 12** se puede observar que el total de flashes es de 228, 13 flashes impactaron a 2 agrupaciones de estructuras y 2 flashes a 3 agrupaciones, por este motivo el total no corresponde con la sumatoria de los flashes a las 42 EE.

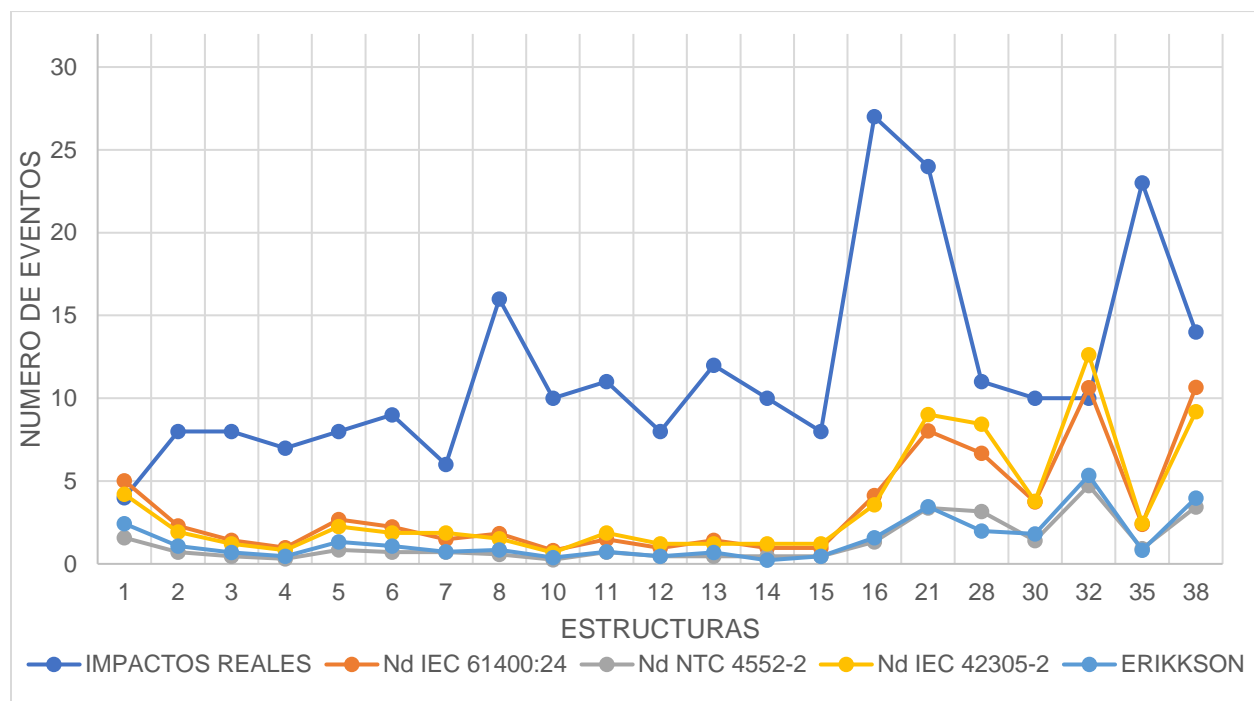
Tabla 12. Comparación de los datos de impactos reales (diciembre 2018 a noviembre 2019) a las estructuras agrupadas por área colectora con respecto a los valores obtenidos aplicando las fórmulas propias de las normas IEC-62305, NTC-4552, IEC61400-24 y ERIKSSON.

ESTRUCTURA	IMPACTOS REALES	N_D IEC 61400:24	N_D NTC 4552-2	N_D IEC 42305-2	ERIKSSON
ESTRUCTURA 1	4	5.02	1.58	4.21	2.43
ESTRUCTURA 2	8	2.29	0.72	1.92	1.09
ESTRUCTURA 3	8	1.44	0.45	1.2	0.69
ESTRUCTURA 4	7	0.99	0.31	0.83	0.46
ESTRUCTURA 5	8	2.69	0.84	2.25	1.32
ESTRUCTURA 6	9	2.23	0.7	1.87	1.09
ESTRUCTURA 7	6	1.48	0.7	1.87	0.72
ESTRUCTURA 8-9	16	1.83	0.57	1.53	0.85
ESTRUCTURA 10	10	0.81	0.26	0.68	0.38
ESTRUCTURA 11	11	1.48	0.7	1.87	0.72
ESTRUCTURA 12	8	0.9	0.42	1.13	0.46
ESTRUCTURA 13	12	1.44	0.45	1.2	0.69
ESTRUCTURA 14	10	0.96	0.45	1.21	0.22
ESTRUCTURA 15	8	0.95	0.45	1.2	0.46
ESTRUCTURA 16-17-18-19-20	27	4.14	1.33	3.56	1.57
ESTRUCTURA 21-22-23-24-25-26-27	24	7.88	3.3	8.82	3.46
ESTRUCTURA 28-29	11	6.68	3.16	8.43	1.99
ESTRUCTURA 30-31	10	3.75	1.41	3.78	1.81
ESTRUCTURA 32-33-34	11	10.64	4.73	12.63	5.34
ESTRUCTURA 35-36-37	23	2.39	0.92	2.45	0.82
ESTRUCTURA 38-39-40-41-42	14	10.67	3.44	9.2	3.98
TOTAL	228	70.6	26.9	71.9	30.6

La Figura 56 la representación gráfica de los valores de la Tabla 12, de esta comparación es posible deducir que existe una diferencia notable entre los valores esperados y los valores reales, lo cual puede deberse a que dichas fórmulas fueron desarrolladas en otras latitudes en las cuales los eventos de rayo pueden presentar un comportamiento distinto lo que impide que sean totalmente extrapolables a otros lugares con otras condiciones climáticas o

altitudes, en el caso de la norma NTC 4552-2 los impactos reales fueron 8.4 veces mayor a los estimados. Otra razón puede deberse a los errores dentro del sistema de detección LINET, también se debe de tener en cuenta que los datos utilizados para el análisis corresponden al periodo de tiempo de apenas un año, el cual está comprendido entre los meses de diciembre de 2018 a noviembre de 2019, la literatura sugiere utilizar periodos más extensos, esto debido a que se pueden presentar grandes variaciones de un año a otro.

Figura 56. Comparación de impactos reales y teóricos respecto al área de captación de las estructuras agrupadas.



5. CONCLUSIONES

Del análisis realizado sobre el comportamiento del rayo, se corroboró la influencia de la región de carga inferior positiva en el impacto a estructuras elevadas, así, de 26 eventos analizados con el LMA se obtuvo que 18 de estos eventos se originaron entre los 4 y 6 km de altura, altura que concuerda con esta región de carga. De donde se puede concluir que cerca del

70% de descargas que impactaron alguna EE iniciaron a alturas en donde se encuentra localizada la región de carga positiva inferior.

Una vez realizado el análisis de riesgo con la norma IEC61400:24, se obtuvo que la cantidad de impactos reales fue 3.3 veces mayor a los impactos teóricos, evidenciando de este modo la necesidad de revisar los estándares actuales de protección contra descargas atmosféricas. Se obtuvo que solo en 2 de las estructuras analizadas los valores teóricos fueron mayores a los valores reales, esto puede deberse a que la altura para el cálculo no era la correcta.

Debido a la alta actividad de rayos que se presenta en las regiones tropicales, es necesario tener en cuenta técnicas de protección adicionales, ya que como se demostró en el análisis de riesgo realizado, los valores reales son mucho más altos a los esperados; adicionalmente el mecanismo de rotación y la altura propia del aerogenerador (+100m) contribuyen a la generación de rayos.

Se trabajó con una muestra de 485 impactos CG que involucraron a las 42 EE, de esta muestra el 88% son CG- y el 12% CG+. Los eventos CG- y CG+ tienen corrientes pico promedio iguales a -25.7kA y 18.03kA. Se obtuvo que la altura promedio de iniciación de los eventos analizados fue 5.73 km, la mayoría de las fuentes registradas por el LMA de líderes negativos se pueden observar entre 3 a 5.5 km y 9 a 12 km, en el caso de líderes positivos de 5.7 a 7.7 km.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abd-Allah, M. A., Said, A., & Ali, M. N. (2015). A novel lightning protection technique of wind turbine components. *The Journal of Engineering*, 2015(12), 348–353. <https://doi.org/10.1049/joe.2015.0175>
- Aranguren, D., Inampué, J., López, J., Tibaduiza, A., Casas, F., Torres, H., & Betz, H. (2013). Colombian Total Lightning Detection Network and early detection of failure risks for power systems. *Simposio Internacional Sobre Calidad de La Energía Eléctrica (VII SICEL)*, 1–6.
- Ardila Murillo, B. S., Soto Ríos, E. A., & Velandia López, K. A. (2022). Actividad de rayos en el departamento de Santander entre 2014 y 2016. *Ingeniería*, 26(3), 419–435. <https://doi.org/10.14483/23448393.17585>
- Diendorfer, G., Thern, S., Ag, S., Kolb, J., & Shulzhenko, E. (2014). Initial Investigation of Influence of Wind Farms to Lightning Events. *2016 33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/ICLP.2016.7791448>
- Eriksson, A. J. (1987). The Incidence of Lightning Strikes to Power Lines. *IEEE Power Engineering Review*, PER-7(7), 66–67. <https://doi.org/10.1109/MPER.1987.5526996>
- Goud, R. D., Rayudu, R., Moore, C. P., & Burmester, D. (2016). Lightning protection analysis of main shaft bearings in wind turbine generators. *2016 IEEE International Conference on Power System Technology, POWERCON 2016*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/POWERCON.2016.7753945>
- Griffiths, R. F., & Phelps, C. T. (1976). MODEL FOR LIGHTNING INITIATION ARISING FROM POSITIVE CORONA STREAMER DEVELOPMENT. *J Geophys Res.* <https://doi.org/10.1029/jc081i021p03671>

- Jiang, J. L., Chang, H. C., Kuo, C. C., & Huang, C. K. (2013). Transient overvoltage phenomena on the control system of wind turbines due to lightning strike. *Renewable Energy*, *57*, 181–189. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.01.020>
- Keraunos S.A.S. (2016). Red Colombiana de detección total de rayos LINET. *Ficha Técnica*.
- López, J. A., Montanyà, J., Van Der Velde, O., Romero, D., Aranguren, D., Torres, H., Taborda, J., & Martínez, J. (2016). First data of the Colombia lightning mapping array - COLMA. *2016 33rd International Conference on Lightning Protection, ICLP 2016*. <https://doi.org/10.1109/ICLP.2016.7791436>
- March, V. (2018). Key issues to define a method of lightning risk assessment for wind farms. *Electric Power Systems Research*, *159*, 50–57. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.08.020>
- March, V., Montanyà, J., Fabró, F., Van Der Velde, O., Romero, D., Solà, G., Freijó, M., & Pineda, N. (2016). Winter lightning activity in specific global regions and implications to wind turbines and tall structures. *2016 33rd International Conference on Lightning Protection, ICLP 2016*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICLP.2016.7791447>
- Montanyà, J., Van Der Velde, O., Domingo-Dalmau, A., Pineda, N., Argemí, O., & Salvador, A. (2016). Lightning mapping observations of downward lightning flashes to wind turbines. *2016 33rd International Conference on Lightning Protection, ICLP 2016*. <https://doi.org/10.1109/ICLP.2016.7791449>
- Montanyà, Joan. (2016). Lightning interaction and damages to wind turbines. *V Russian Conference on Lightning Protection*, 1–15.
- Montanyà, Joan, Fabró, F., Van Der Velde, O., March, V., Rolfe Williams, E., Pineda, N.,

- Romero, D., Sol, G., & Freijo, M. (2016). Global distribution of winter lightning: A threat to wind turbines and aircraft. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(6), 1465–1472. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-1465-2016>
- Montanyà, Joan, van der Velde, O., & Williams, E. R. (2014). Lightning discharges produced by wind turbines. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(3), 1455–1462. <https://doi.org/10.1002/2013JD020225>
- Nguyen, T., Pham, T., Tran, T. V., & Huu Tran, T. (2017). Lightning protection for wind turbines in Vietnam. *Journal of International Council on Electrical Engineering*, 7(1), 29–33. <https://doi.org/10.1080/22348972.2016.1265909>
- Pineda, N., Montanyà, J., Salvador, A., van der Velde, O. A., & López, J. A. (2018). Thunderstorm characteristics favouring downward and upward lightning to wind turbines. *Atmospheric Research*, 214, 46–63. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.07.012>
- Rakov, V. A., & Uman, M. A. (2003). *Lightning: Physics and Effects - Vladimir A. Rakov, Martin A. Uman - Google Books*. Cambridge.
- Soula, S., Georgis, J., & Salaün, D. (2019). Quantifying the effect of wind turbines on lightning location and characteristics. *Atmospheric Research*, 221(January), 98–110. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.01.010>
- States, U., Iec, I., Uman, M. A., Engineering, E., Engineering, C., Rakov, V. A., Geophysical, A., John, U., Fleming, A., & Medal, H. H. (n.d.). *The Art and Science of Lightning Protection*.
- Thottappillil, R., & Rakov, V. A. (1997). Distribution of charge along the lightning channel:

Relation to remote electric and magnetic fields and to return-stroke models. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. <https://doi.org/10.1029/96JD03344>

Ukar, O., & Zamora, I. (2011). Wind farm grounding system design for transient currents. *Renewable Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.12.026>

Van Der Velde, O. A., & Montanyà, J. (2013). Asymmetries in bidirectional leader development of lightning flashes. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, *118*(24), 13,504-13,519. <https://doi.org/10.1002/2013JD020257>