

**INSTALACIÓN Y PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA LMA
(*LIGHTNING MAPPING ARRAY*) EN BARRANCABERMEJA**

**DIDIER FERNANDO ARGÜELLO BARBOSA
HERIBERT TELLO RODRIGUEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2019

**INSTALACIÓN Y PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA LMA
(*LIGHTNING MAPPING ARRAY*) EN BARRANCABERMEJA**

**DIDIER FERNANDO ARGÜELLO BARBOSA
HERIBERT TELLO RODRIGUEZ**

Trabajo de Grado para optar el título de Ingeniero Electricista

**DIRECTOR
EDISON ANDRÉS SOTO RÍOS
Dr. en Ingeniería - Línea Automática**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2019

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	18
1.1 OBJETIVOS	18
1.1.1 Objetivo General.	18
1.1.2 Objetivos Específicos	18
1.2 ALCANCE	18
1.3 JUSTIFICACIÓN	19
2. TEORÍA DEL RAYO Y ANTECEDENTES DEL SISTEMA LMA	22
2.1 EL RAYO	22
2.1.1 Categorización del rayo.	22
2.1.2 Proceso de formación del rayo.	23
2.1.2.1 Líder escalonado.	23
2.1.2.2 Descarga de retorno.	24
2.2 ESTUDIOS REALIZADOS CON LA RED LMA	24
2.3 DESCRIPCION DE LA RED LMA	26
2.3.1 Componentes de una estación LMA	28
2.3.2 Proceso de funcionamiento de una estación LMA.	34
2.3.3 Funcionamiento del sistema LMA.	35
3. RESULTADOS OBTENIDOS CON LA RED LMA	37
3.1 EVALUACION DE SITIOS	37
3.2 EJEMPLOS DE EPISODIOS DE TORMENTA	41
3.2.1 Programa para visualización de datos de salida de la red LMA.	41
3.2.2 Ejemplo 1: Tormenta 4 de junio del 2018, 9:40-9:50 UTC.	41
3.2.2.1 Rayo individual IC (Intra-nube).	44
3.2.3 Ejemplo 2: Tormenta 23 de noviembre del 2018	45

3.2.3.1 Rayos con origen por debajo de 8 kilómetros	48
3.2.3.2 Rayos con origen entre 9 y 11 kilómetros de altura .	51
3.2.3.3 Rayos con origen entre 11 y 15 km de altura.	54
4. CONCLUSIONES	57
BIBLIOGRAFÍA	59

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Resultados pruebas	40

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Categorías del rayo.....	22
Figura 2. Ubicación geográfica de las estaciones LMA	27
Figura 3. Antena de la estación LMA.....	28
Figura 4. Tubo de soporte para acople de las antenas.....	28
Figura 5. a) Acople para las antenas, b) Cambio de impedancia de 50 a 75 [Ω] ...	29
Figura 6. Filtro Pasa-Banda para canal 3 de TV-VHF, entre 60-66 MHz	29
Figura 7. Pre-Amplificador	30
Figura 8. GPS	30
Figura 9. Modem.....	31
Figura 10. Cable Coaxial de 75 [Ω].....	31
Figura 11. Fuente AC-DC	32
Figura 12. Unidad LMA	32
Figura 13. Esquema de funcionamiento de una estación LMA.....	34
Figura 14. Esquema de funcionamiento del sistema LMA.	36
Figura 15. Terraza edificio UIS	38
Figura 16. Resultados mostrados en la pantalla de acceso al Procesador del LMA.	39
Figura 17. Tormenta 4 de junio del 2018.	42
Figura 18. Estructura tripolar de la tormenta 4 de junio del 2018.	43
Figura 19. Panel de altura Vs tiempo.....	44
Figura 20. Panel de planta (latitud vs longitud)	44
Figura 21. Rayo Bidireccional	45
Figura 22. Tormenta 23 de noviembre 2018.....	46
Figura 23. Estructura tripolar de la tormenta 23 de noviembre del 2018.	47
Figura 24. Rayo a 5.3 km de altura.....	48

Figura 25. Rayo a 4.9 km de altura.....	49
Figura 26. Fuente de rayo a 956 metros del suelo.....	50
Figura 27. Rayo a 2 km de altura.....	51
Figura 28. Rayo a 9.5 km de altura.....	52
Figura 29. Rayo a 10.5 km de altura.....	53
Figura 30. Rayo a 10 km de altura.....	54
Figura 31. Rayo a 11.8 km de altura.....	55
Figura 32. Rayo a 11.3 km de altura.....	56

GLOSARIO

ATMÓSFERA es la capa gaseosa estratificada que rodea, por acción de la fuerza de gravedad, la Tierra, un cuerpo celeste u otro cuerpo cualquiera. está compuesta por un conjunto de gases entre los cuales destacan principalmente el nitrógeno (78%) y el oxígeno (21%), siendo que el porcentaje restante (apenas 1%) se lo reparten el dióxido de carbono, los gases nobles, el vapor de agua y el ozono.

CAMPO ELÉCTRICO es la región del espacio en la que cualquier carga situada en un punto de dicha región experimenta una acción o fuerza eléctrica debido a la presencia de una carga o cargas eléctricas.

CAMPO MAGNÉTICO es un campo de fuerzas que se encuentra siempre rodeando una fuente de energía magnética, y es en esta región donde interactúan con ella los elementos sensibles al magnetismo, como son los metales ferromagnéticos. O sea, que fuera de este campo magnético no se producen los efectos del magnetismo.

ENERGÍA ACÚSTICA es la energía que transmiten o transportan las ondas sonoras. Procede de la energía de la vibración del foco sonoro y se propaga a las partículas del medio que atraviesan en forma de energía cinética (movimiento de las partículas), y de energía potencial (cambios de presión producidos en dicho medio o presión sonora).

ENERGÍA ELECTROMAGNÉTICA es la cantidad de energía almacenada en una región del espacio que podemos atribuir a la presencia de un campo electromagnético, y que se expresará en función de las intensidades del campo magnético y campo eléctrico. En un punto del espacio la densidad

de energía electromagnética depende de una suma de dos términos proporcionales al cuadrado de las intensidades del campo.

NIVEL CERÁUNICO es el número promedio de días al cabo del año en los que hay tormenta. Se considera día con tormenta a aquel en el que al menos se oye un trueno. Sirve para crear mapas útiles como referencia sobre la probabilidad de caída de rayos, se acude al trazado de líneas isoceráunicas, que son aquellas que delimitan áreas territoriales con un mismo nivel ceráunico.

RAYO es una poderosa descarga natural de electricidad estática, producida durante una tormenta eléctrica, que genera un pulso electromagnético. La descarga eléctrica precipitada del rayo es acompañada por la emisión de luz (el relámpago), causada por el paso de corriente eléctrica, que ioniza las moléculas de aire, y por el sonido del trueno, desarrollado por la onda de choque

RIGIDEZ DIELECTRICA es el valor límite de la intensidad del campo eléctrico en el cual un material pierde su propiedad aislante y pasa a ser conductor. Se mide en voltios por metro V/m. También podemos definirla como la máxima tensión que puede soportar un aislante sin perforarse. A esta tensión se la denomina tensión de rotura de un dieléctrico.

SENSORES un sensor es todo aquello que tiene una propiedad sensible a una magnitud del medio, y al variar esta magnitud también varía con cierta intensidad la propiedad, es decir, manifiesta la presencia de dicha magnitud, y también su medida.

ZONAS TROPICALES es una franja geográfica imaginaria alrededor del planeta delimitada por el trópico de Cáncer al norte y por el trópico de Capricornio al sur. Su centro es la línea ecuatorial; por ello incluye toda el área tropical. Es la zona climática más extensa del planeta: ocupa una superficie aproximada de 220

millones de km². Abarca tanto el Neotrópico (trópico americano) como el Paleotrópico (trópicos del Viejo Mundo). Se caracteriza por recibir una alta radiación solar y tener una pequeña oscilación térmica anual. La duración del día y la noche es relativamente constante a lo largo del año, y ocurren lluvias y sequías extremas.

RESUMEN

TÍTULO: INSTALACIÓN Y PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA LMA (*LIGHTNING MAPPING ARRAY*) EN BARRANCABERMEJA*

AUTORES: DIDIER FERNANDO ARGÜELLO BARBOSA
HERIBERT TELLO RODRIGUEZ**

PALABRAS CLAVE: VHF, LMA, Rayo, Tormenta Eléctrica, Interferencia Electromagnética, Sensor.

DESCRIPCIÓN:

Se estudia la posibilidad de instalación del sistema LMA (Lightning Mapping Array) en Barrancabermeja Santander y parte de sus alrededores, teniendo como antecedente el alto nivel cerámico de esta zona del país para analizar tormentas eléctricas. Usando una de las estaciones se realiza el análisis de interferencia en cada uno de los sitios donde se proyecta ubicarlas, con el fin de saber si el umbral de interferencia es óptimo para la instalación. Se describe el funcionamiento de cada estación individual y del sistema completo, que en este caso está conformado por un total de 6 estaciones que se distribuyen de tal forma que se encierra una región, manteniendo una línea base de 15 a 25 km entre cada una.

Se muestran a modo de ejemplo dos tormentas, una del 4 de junio del 2018 y otra del 23 de noviembre del 2018, usando el programa *LMA Zoom Viewer* desarrollado en la *Universidad Politécnica de Cataluña* por el grupo *Lightning Research Group*. Para la primera tormenta se hace una descripción general, mencionando tiempo, área, cantidad de rayos, cantidad de fuentes detectadas y tipo de rayo (intra-nube o nube-tierra). Para la segunda tormenta se analizaron rayos individuales que se iniciaron a diferentes alturas, para esto se usó el método de tiempo-distancia desarrollado por *Van Der Velde y Montanyà*¹, con el objetivo de hacer seguimiento a las velocidades y alturas de los líderes del rayo.

* Trabajo de grado.

** Facultad de Ingeniería Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Dr. Edison Andrés Soto Ríos.

¹ VAN DER VELDE, O. A.; Montanyà. Asymmetries in bidirectional leader development of lightning flashes. 2013

ABSTRACT

TITLE: INSTALLATION AND COMMISSIONING OF THE LMA SYSTEM (LIGHTNING MAPPING ARRAY) IN BARRANCABERMEJA*

AUTHOR: DIDIER FERNANDO ARGÜELLO BARBOSA
HERIBERT TELLO RODRIGUEZ**

KEYWORDS: VHF, LMA, Flash, Electrical Storm, Electromagnetic Interference, Sensor.

DESCRIPTION:

The possibility of installing the LMA (Lightning Mapping Array) system in Barrancabermeja Santander and part of its surroundings is studied, taking as a precedent the high keraunic level of this area of the country to analyze electrical storms. Using one of the stations, the interference analysis is performed in each of the sites where it is planned to locate them, in order to know if the interference threshold is optimal for the installation. It describes the operation of each individual station and the complete system, which in this case is made up of a total of 6 stations that are distributed in such a way that a region is enclosed, maintaining a baseline of 15 to 25 km between each one.

Two storms are shown as an example, one from June 4, 2018 and another from November 23, 2018, using the LMA Zoom Viewer program developed at the Polytechnic University of Catalonia by the Lightning Research Group. For the first storm a general description is made, mentioning time, area, number of flashes, number of sources detected and type of lightning (intra-cloud or cloud-earth). For the second storm, individual flash that were started at different heights were analyzed, for this the time-distance method developed by *Van Der Velde and Montanyà*¹ was used, in order to track the speeds and heights of the lightning leaders.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingeniería Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Dr. Edison Andrés Soto Ríos.

¹ VAN DER VELDE, O. A.; Montanyà. Asymmetries in bidirectional leader development of lightning flashes. 2013

INTRODUCCIÓN

Existe una gran cantidad de sucesos generados por las descargas atmosféricas que afectan a los seres humanos y a los sistemas eléctricos. Los resultados de algunas investigaciones consideran que los rayos causan aproximadamente el 50% de las perturbaciones electromagnéticas que generan problemas en los sistemas eléctricos de distribución, y se estima que las afectaciones en la calidad de la energía eléctrica son entre el 70 y el 80%. Colombia es un país tropical con una cadena de relieves y climas complejos, que además está dentro de la Zona de Convergencia Intertropical dada por los vientos alisios del noreste y sureste que dan como resultado que ciertas regiones del país tengan alta actividad de rayos como lo son los valles de los ríos Magdalena y Cauca, Catatumbo, Pacífico entre otras regiones que se definieron claramente como sitios de alta actividad de rayos con más de un centenar de tormentas eléctricas por año².

Por esta razón en el mes de abril del año 2015 se situó una red de sensores LMA (Lightning Mapping Array) en Santa Marta, Colombia (COLMA) en el marco de la misión ASIM (Atmosphere Space Interactions Monitor). El sistema LMA detecta las fuentes de emisiones de radio VHF de descargas de rayos, en este caso las señales entre la banda de 60 a 66 MHz son detectadas por sensores de tierra base y miden la magnitud y los tiempos de llegada de los ruidos de radio producidos por los líderes de iluminación. Los destellos individuales representan varias fuentes de rayos y pueden reconstruirse a través de mapas de rayos en una ubicación tridimensional. Se analizaron un total de 7000 rayos individuales de septiembre a noviembre de 2015, y se han procesado hasta 481000 fuentes. Los hallazgos sugieren que, la tormenta tropical tiene un desarrollo vertical más alto, donde los líderes de los rayos

² GÓMEZ J.C. Y MORCOS, M.M. "Voltage Sag and Recovery Time in Repetitive Events," IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 17, N.º 4, 2002 pp. 1037-1043.

pueden propagarse hasta 18 km de altura. Estos registros son el primer conjunto de mapas de rayos VHF total obtenidos en zonas tropicales ³.

Para continuar el estudio de tormentas eléctricas en zonas tropicales en esta parte de América del sur se pretende llevar a otro escenario el sistema LMA, instalando la red de sensores en la ciudad de Barrancabermeja. Este documento muestra de forma general el funcionamiento de la red LMA y se expone a modo de ejemplo dos episodios de tormentas, junto a la descripción de 8 rayos individuales, usando datos de la red instalada. El trabajo se realizó por medio del *convenio marco* entre la UIS (Universidad Industrial de Santander) y la UPC (Universidad Politécnica de Cataluña) quienes son propietarios de los equipos que conforman la red LMA.

³ Jesús Alberto López, Joan Montanyà, Oscar van der Velde, David Romero (2016). First data of the Colombia Lightning Mapping Array – COLMA. *Preprint of the: 2016 International Conference on Lightning Protection (ICLP)*.

1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

1.1 OBJETIVOS

A continuación, se presentan el objetivo general y objetivos específicos.

1.1.1 Objetivo General. Instalar y poner en marcha la red LMA (Lightning Mapping Array) en la ciudad de Barrancabermeja.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Identificar las características que deben tener los lugares para la instalación de los sensores que conforman el sistema.
- Determinar los lugares de instalación de los sensores a partir del análisis de mediciones de interferencia.
- Realizar la instalación, pruebas y puesta en marcha de los sensores y su integración al sistema LMA.

1.2 ALCANCE

Este trabajo pretende llevar a cabo la instalación de la red de sensores LMA en la ciudad de Barrancabermeja y sus alrededores, con el fin de aprovechar las condiciones topográficas de esta región que la caracterizan como una zona con alto nivel cerámico para el estudio de tormentas tropicales.

Como punto de partida se revisarán las características que deben cumplir cada uno de los sitios para poder instalar los sensores, dichas características primordiales

son: cobertura satelital de internet, servicio de energía eléctrica e interferencia electromagnética.

Las mediciones y el análisis que se realizarán será un trabajo en conjunto, donde se tendrá el apoyo de la UPC (Universidad Politécnica de Cataluña), quienes brindarán información de los lugares que pueden ser adecuados para la instalación y soporte logístico para la implementación de la red LMA. Esto permitirá realizar una primera visita a los sitios tentativos para la ubicación de las estaciones de la red LMA, con el objeto de verificar que las condiciones de interferencia sean las admisibles para el buen funcionamiento de cada uno de los sensores.

Verificada las condiciones óptimas de interferencia se procederá a instalar 6 estaciones que conformaran la red LMA. Con los datos recolectados de la red se pretende exponer a manera de ejemplo uno de los episodios de tormentas registrados que permitirá evidenciar el comportamiento de las tormentas tropicales en esta zona del país. Los resultados de este trabajo serían de gran provecho para generar un desarrollo en futuras investigaciones que den paso al análisis y caracterización de tormentas tropicales que podrían mejorar la implementación de sistemas de protección contra las descargas atmosféricas.

1.3 JUSTIFICACIÓN

La matriz de mapeo de rayos (LMA) fue desarrollada en New Mexico Tech y sigue el modelo del sistema de Detección y Rango de Rayos (LDAR) desarrollado en el Centro Espacial Kennedy de la NASA⁴. El 25 de junio del 2000 durante el Estudio de Electrificación y Precipitación de Tormentas Severas (STEPS) en las llanuras de

⁴ RISON, W., R. J. THOMAS, P. R. KREHBIEL, T. HAMLIN, and J. HARLIN A GPS-based three-dimensional lightning mapping system: Initial observations in central New Mexico, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 1999 3573–3576, doi:10.1029/1999GL010856.

Estados Unidos específicamente el noreste de Colorado, el sureste de Nebraska y noreste de Kansas, se usaron datos de una matriz tridimensional de mapeo de rayos (LMA)⁵.

En 2012 se usaron cinco redes de estaciones LMA en tres regiones (Oklahoma-Texas, North Alabama y Colorado). Un objetivo central del estudio fue caracterizar las emisiones de [NO_x] por los rayos, por lo que las LMA debían proporcionar las velocidades de destello y la longitud del canal ⁶ ⁷. En abril de 2015 se instaló una red LMA en Santa Marta, Colombia (COLMA) en el marco de la misión Atmosphere Space Interactions Monitor-ASIM.

Las LMA operan detectando la radiación de las descargas de un rayo en un canal de televisión VHF no utilizado, en este caso, el Canal 3 (60-66 MHz). En lugar de enviar datos de gran ancho de banda a un sitio central para medir los valores de tiempo de llegada, el sistema utiliza la tecnología del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) para medir los tiempos de llegada de manera independiente en cada ubicación remota⁸.

El sistema LMA ha sido únicamente usado en zonas templadas (zona comprendida entre uno de los círculos polares y uno de los trópicos.) de Estados Unidos y Europa. Usar el sistema en una región que hace parte de la ZCIT (Zona de Convergencia Intertropical) como lo es Colombia, puede dar inicio a nuevos descubrimientos acerca del comportamiento y desarrollo de las tormentas tropicales.

⁵ STEPHANIE A. WEISS, W. DAVID Rust and DONALD r. MACGORMAN, ERIC C. BRUNING, PAUL KREHBIEL R., Evolving Complex Electrical Structures of the STEPS 25 June 2000 Multicell Storm.

⁶ BARTH, M., et al. The Deep Convective Clouds and Chemistry (DC3) field campaign, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 96, 2015 1281–1309, doi:10.1175/BAMS-D-13-00290.1.

⁷ KOSHAK, W. J., H. S. PETERSON, E. W. MCCAUL, AND A. BIAZAR Estimates of the lightning NO_x profile in the vicinity of the North Alabama Lightning Mapping Array, paper presented at 3rd International Lightning Meteorology Vaisala, Orlando, Fla., 2010 21–22 April.

⁷ KREHBIEL, P. R., R. J. THOMAS, W. RISON, T. HAMLIN, J. HARLIN, and M. DAVIS, Conference, Vaisala, Orlando, Fla., 21–22 April.

⁸ KREHBIEL, P. R., R. J. THOMAS, W. RISON, T. HAMLIN, J. HARLIN, AND M. DAVIS,; Lightning mapping observations in central oklahoma. *Earth Obs. Systems*, In Press. 2005

Debido a que la ciudad de Barrancabermeja Santander está ubicada en una zona tropical, posee una alta densidad de descargas atmosféricas o rayos en ciertos sectores de su territorio. Con el objetivo de aprovechar esta característica de ser un potencial laboratorio natural de rayos, se pretende determinar la posibilidad de instalar la red LMA (Lightning Mapping Array), siendo este un sistema avanzado para la caracterización de tormentas tropicales. Además, esto permitiría recolectar datos para realizar un análisis a fondo del comportamiento de los rayos en esta región.

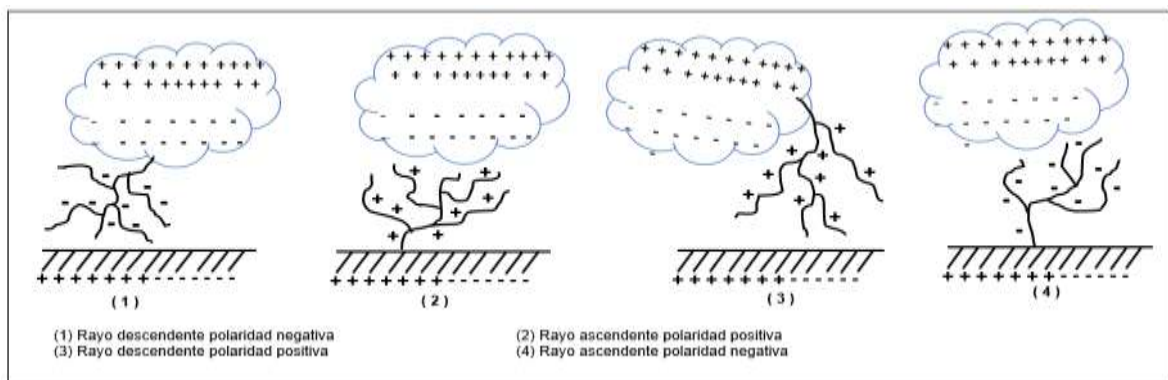
2. TEORÍA DEL RAYO Y ANTECEDENTES DEL SISTEMA LMA

2.1 EL RAYO

2.1.1 Categorización del rayo. La reacción eléctrica que desencadena un rayo se da por la saturación de cargas electrostáticas que han sido generadas y apiladas progresivamente en la nube durante la activación del fenómeno eléctrico de una tormenta. El efecto rayo se representa aleatoriamente entre nube-nube, nube-tierra o tierra-nube a partir de un potencial eléctrico, entre dos puntos o zonas de influencias de diferente polaridad e igual potencial, para compensar las cargas.

En 1978 Berger fue el primero en proponer cuatro ejemplos de rayos en términos de la trayectoria del movimiento entre nube y tierra: ascendente o descendente y en términos del signo de la carga del líder que inicia la descarga: positivo o negativo⁹.

Figura 1. Categorías del rayo



La categoría 1 (rayos negativos nube-tierra) es aparentemente la más común. De acuerdo con estadísticas disponibles a nivel mundial, más del 90% de las descargas

⁹ TORRES H.. El rayo. Mitos, leyendas, ciencia y tecnología. (2002).

son de esta categoría. Sin embargo, en la indagación sobre caracterización espacio-temporal de rayos en Colombia, un análisis espacial (zona central colombiana) y temporal (1992-1993) en el mes de octubre, se ha encontrado que los rayos pueden ser en un 100% de categoría 3 (rayos positivos nube tierra). La investigación a este nivel aún continúa, y ya hay resultados similares de otros investigadores en otras latitudes de la tierra¹⁰.

2.1.2 Proceso de formación del rayo. Gran porcentaje de los rayos nube-tierra se inician por el campo eléctrico que está en la carga positiva establecida en la parte inferior de la nube y la carga negativa de la base de la nube. Cuando la nube se ha cargado lo suficiente hasta que el campo eléctrico sobrepasa la rigidez dieléctrica en ese punto de la atmósfera, el resultado es el comienzo de una descarga eléctrica o rayo. En ese momento, el campo eléctrico es del orden de un millón de voltios por metro; en menos de un segundo. En este pequeño intervalo de tiempo, la energía electrostática de la carga almacenada pasa a ser energía electromagnética, energía acústica y, finalmente, calor.

Las descargas eléctricas se componen básicamente de cinco fases según como se enumeran a continuación:

1. El encendido de la de carga
2. Líder escalonado
3. Proceso de enlace
4. Descarga de retorno
5. Líder dardo

2.1.2.1 Líder escalonado. El líder escalonado comienza su primera descarga de retorno al dispersarse el rayo de nube a Tierra en una serie de pasos discretos. El líder escalonado se da por el encendido de la descarga al interior de la nube.

¹⁰ TORRES H.. El rayo. Mitos, leyendas, ciencia y tecnología. (2002).

En varios estudios se ha observado que los pasos del líder son característicos de $1\ \mu s$ de duración y decenas de metros de longitud, con una tardanza entre pasos de $50\ \mu s$. El líder escalonado baja hasta diez o más culombios de carga negativa de la nube en milisegundos, con una velocidad promedio de bajada de $2 \times 10^5\ m/s$.

Se considera que la media de la corriente del líder escalonado es de 100 a 1000 (Amperios). Los pasos tienen pulsos de corriente de al menos 1 kiloamperio. Asociado con estas corrientes hay pulsos de campos eléctricos y magnéticos con anchos de cerca de $1\ \mu s$ o menos y tiempos de ascenso de $0.1\ \mu s$ menos¹¹.

2.1.2.2 Descarga de retorno. La descarga de retorno es una onda de campo eléctrico que sube por el canal del líder escalonado, alcanzando, en la mayoría de los casos, a penetrar en la base de la nube. Esta onda ionizante baja de la nube de 2 a 10 culombios de carga eléctrica con corrientes de hasta 10^5 amperios y es la fase más energética del rayo¹².

2.2 ESTUDIOS REALIZADOS CON LA RED LMA

La red LMA (Lightning Mapping Array) es un sistema tridimensional de localización de rayos, fue desarrollado en el Instituto de Minería y Tecnología de Nuevo Mexico siguiendo el modelo LDAR (Sistema de Detección y Rango de Rayo) desarrollado en el Centro Espacial Kennedy de la NASA. El sistema usa la técnica TOA, para medir los tiempos de llegada de la radiación que emite una descarga de rayo a una red de estaciones ubicadas en tierra, usando un canal de Tv VHF no utilizado,

¹¹ TORRES H.. El rayo. Mitos, leyendas, ciencia y tecnología. 2002

¹² Ibíd.

localizando las fuentes de la radiación para construir en tres dimensiones la actividad total del rayo^{13 14 15}.

En Oklahoma se usaron 10 estaciones LMA. La noche del 10 y 11 de junio de 1998 el sistema logro detectar rayos durante el evento de tormenta, aproximadamente una vez por segundo en diferentes ubicaciones a lo largo del área de actividad. El 25 de junio del 2000 se estudiaron las estructuras eléctricas de una tormenta durante el Estudio de Electrificación y Precipitación de Tormentas Severas (STEPS) en las llanuras de Estados Unidos específicamente el noreste de Colorado, el sureste de Nebraska y noreste de Kansas, para esto se usaron datos de una red LMA^{16 17}. En el año 2006 se instaló una red LMA compuesta por 8 estaciones desplegadas alrededor de un área de 70 x 100 km en la ciudad de Washington DC, para mapear la actividad total de rayos¹⁸.

Durante el verano del año 2011, se instaló una matriz tridimensional de mapeo de rayos (LMA) en el Delta del Ebro y las áreas circundantes en el este de España. En este mismo año se tenían 6 sensores en operación de los 12 existentes, en la banda VHF de 60-66 MHz. Para este mismo sistema se creó un gráfico de tiempo-distancia-altitud, tomando el origen del rayo como referencia, con el objetivo de

¹³ MAIER, L., C. LENNON, T. Britt, and S. SCHAEFER, *LDAR system performance and analysis*, paper presented at International Conference on Cloud Physics, Am. Meteorol. Soc, Dallas, Tex., Jan. 1995.

¹⁴ RISON, W, R. J. THOMAS, PR. KREHBIEL, T. HAMLIN, and J. HARLIN, A GPS-based three-dimensional lightning mapping system: Initial observations in central New Mexico, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 3573-3576, 1999.

¹⁵ PROCTOR, D. E., A hyperbolic system for obtaining VHF radio pictures of lightning, *J. Geophys. Res.*, 76, 1478-1 489, 1971.

¹⁶ RISON, W, R. J. THOMAS, PR. KREHBIEL, T. HAMLIN, J. HARLIN, AND M. DAVIS. GPS-based mapping system reveals lightning inside storms: *EOS*, Vol. 81, No. 3, January 18, 2000.

¹⁷ STEPHANIE A. WEISS, W. DAVID RUST AND DONALD R. MACGORMAN, ERIC C. BRUNING, PAUL R. KREHBIEL, *Evolving Complex Electrical Structures of the STEPS 25 June 2000 Multicell Storm*. 2007

¹⁸ PR. Krehbiel. The DC Lightning Mapping Array. New Mexico Tech, Socorro, NM. http://www.lightning.nmt.edu/nmt_lms/

seguir el desarrollo horizontal de los líderes positivos y negativos a lo largo del tiempo^{19 20}.

En abril de 2015 se instaló la red LMA en Santa Marta, Colombia (COLMA) en el marco de la misión Atmosphere Space Interactions Monitor-ASIM. Con el fin de estudiar el desarrollo de las tormentas eléctricas en zona tropical²¹. Los resultados generales del análisis de dos tormentas eléctricas observadas con la red COLMA, mostraron que los rayos se inician entre 4 y 15 km de altura y las tormentas tienen una estructura tripolar típica²².

2.3 DESCRIPCION DE LA RED LMA

El sistema LMA (Lightning Mapping Array) instalado en la ciudad de Barrancabermeja y sus alrededores está conformado por 6 estaciones, ubicadas en los sitios mostrados en la figura 2 y cumplieron en orden de importancia las siguientes condiciones:

- La línea base (distancia de separación entre sensores) del sistema debe estar de 5 a 25 km aproximadamente.
- Se debe buscar que la distribución de los sensores logré encerrar una región, evitando que queden totalmente alineados entre ellos.
- Se debe procurar encontrar sitios con condiciones de temperatura y humedad adecuadas para el cuidado de los equipos, ya que son muy costosos.

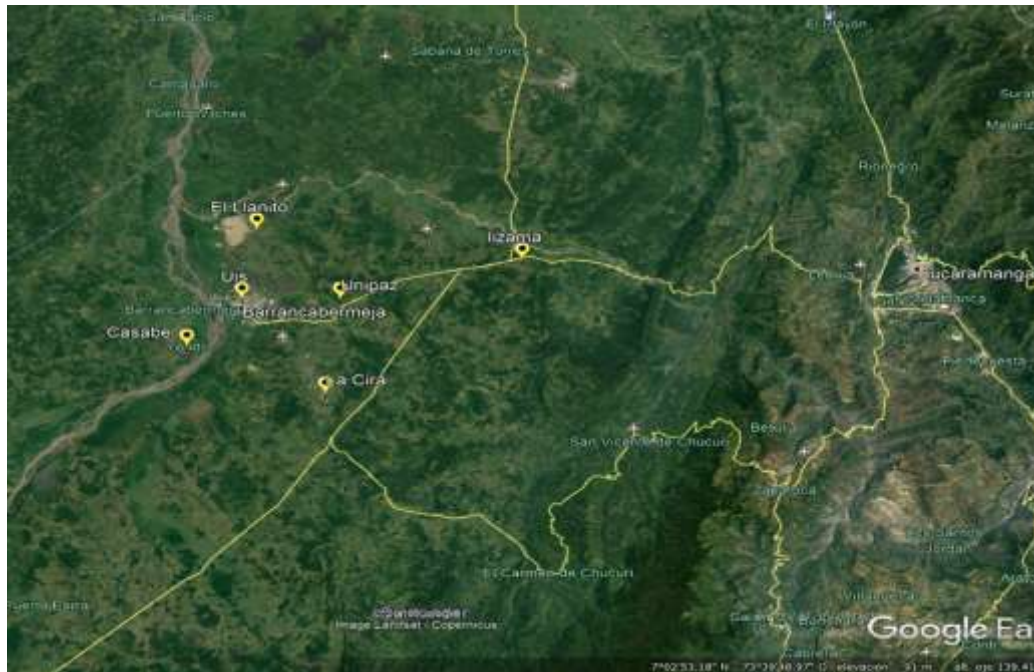
¹⁹ VAN DER VELDE, O. A.; MONTANYÀ, J.; ROMERO, D.; PINEDA, N.; SOULA, S. Ebro Lightning Mapping Array: sprite-producing lightning and ground-to-cloud-to-ground flashes. 2014

²⁰ VAN DER VELDE, O. A.; Montanyà. Asymmetries in bidirectional leader development of lightning flashes. 2013

²¹ LÓPEZ Jesús Alberto, MONTANYÀ Joan, VAN DER VELDE Oscar, ROMERO David. First data of the Colombia Lightning Mapping Array – COLMA. Preprint of the: 2016 International Conference on Lightning Protection (ICLP). 2016

²² LÓPEZ Jesús A., MONTANYÀ Joan, VAN DER VELDE Oscar A., PINEDA Nicolau, Albert Salvador, ROMERO David, ARANGUREN Daniel, TABORDA John. Charge Structure of Two Tropical Thunderstorms in Colombia. 2019 American Geophysical Union, doi: 10.1029/2018JD029188.

Figura 2. Ubicación geográfica de las estaciones LMA



El sistema LMA detecta señales de rayo VHF (Muy Alta Frecuencia), en este caso las señales que están entre los 60 y 66 [MHz] y permite ubicar en 3 dimensiones las fuentes de rayos emitidas por los líderes. 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.

2.3.1 Componentes de una estación LMA

Figura 3. Antena de la estación LMA



Varillas que
componen la
Antena

Figura 4. Tubo de soporte para acople de las antenas



Figura 5. a) Acople para las antenas, b) Cambio de impedancia de 50 a 75 [Ω]

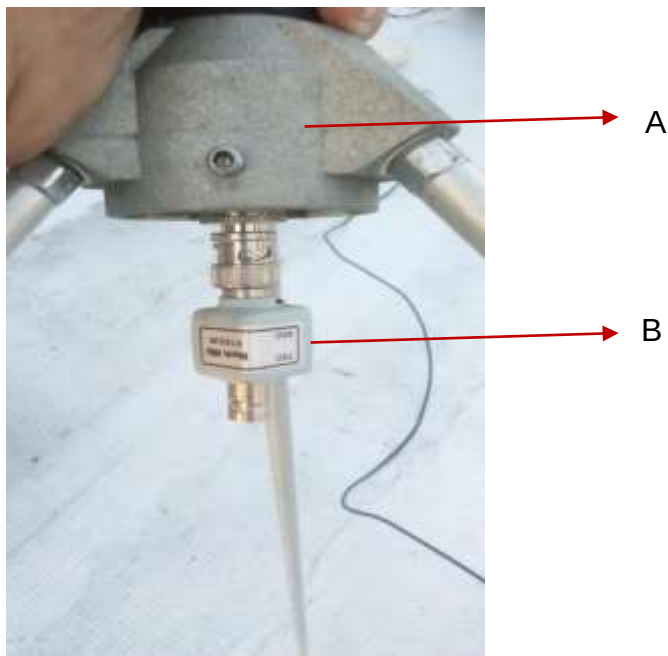


Figura 6. Filtro Pasa-Banda para canal 3 de TV-VHF, entre 60-66 MHz



Figura 7. Pre-Amplificador



Figura 8. GPS



Figura 9. Modem



Figura 10. Cable Coaxial de 75 [Ω]



Figura 11. Fuente AC-DC



Figura 12. Unidad LMA

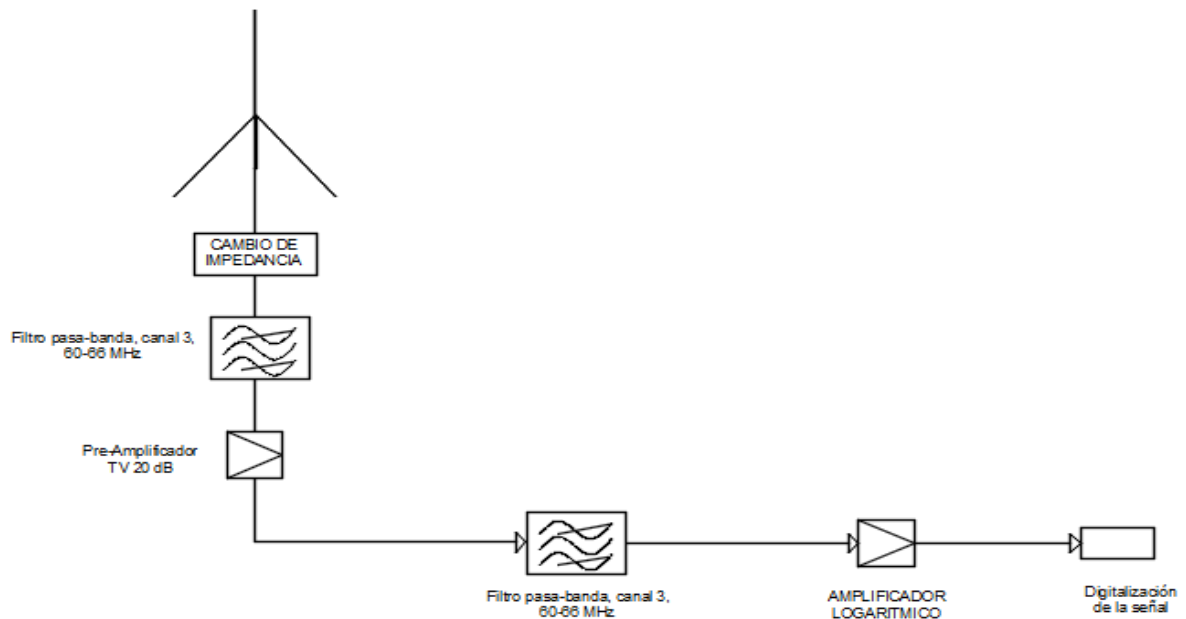


Ahora se define el uso de los componentes mostrados de la estación LMA:

- **Antena:** la antena está compuesta por cuatro varillas de aluminio de 1,13 metros de longitud.
- **Acople de antena:** es el soporte de las cuatro varillas que componen la antena de la estación.
- **Cambio de impedancia:** es el convertidor de impedancia de 50 $[\Omega]$ a 75 $[\Omega]$, los 50 Ω son el valor de impedancia del conjunto de la antena y el acople, y los 75 Ω corresponden al cable coaxial usado.
- **Filtro pasa banda:** el filtro funciona para el canal 3 de TV, es decir radio frecuencias (RF) que pasan por una banda de 6 MHz, específicamente entre los 60 y 66 MHz.
- **Pre-Amplificador:** este es un preamplificador de alta ganancia (20 dB) y de bajo ruido, se usa para dar paso a las señales más débiles, permitiendo que se amplifiquen a un nivel de potencia visible.
- **Cable coaxial de 75 $[\Omega]$:** la preferencia en el uso del cable de 75 $[\Omega]$ se hace por su buena eficiencia y baja pérdida de las señales que pasan a través de este.
- **Modem:** se usa para garantizar el acceso a internet en cada una de las estaciones y de esta manera verificar su funcionamiento de forma remota.
- **Fuente AC-DC:** fuente de alimentación para cada unidad de operación LMA del sistema.
- **Batería de 12 V:** se usa como respaldo en caso de ausencia de energía por parte la red local donde se encuentra la estación, con el fin de mantener el sistema en funcionamiento.
- **Unidad LMA:** es la unidad de operación de cada estación LMA, en forma general internamente está conformada por una unidad de proceso, un adaptador inalámbrico, un detector logarítmico, un receptor GPS, un preamplificador de VHF, un filtro pasa banda VHF, un disco duro y la Board del LMA.

2.3.2 Proceso de funcionamiento de una estación LMA. En la figura 13 se muestra el esquema de funcionamiento de una estación LMA desde su etapa inicial, donde se realiza la recepción de la señal, hasta su etapa final donde se guarda la información en el disco duro.

Figura 13. Esquema de funcionamiento de una estación LMA.



La antena en disposición vertical está sintonizada en el canal 3 de TV, es decir a 66 MHz. Luego viene la etapa de ajuste de impedancia; es necesaria para evitar el problema de ondas estacionarias y mantener la calidad de las señales que se reciben. Se realiza el proceso de filtrado de las señales que se reciben usando un filtro pasa banda de 6 MHz y se pre-amplifican las señales. Luego en la unidad de proceso del LMA, se realiza una segunda fase de filtrado. Después mediante un amplificador logarítmico se provee la potencia de RF de la señal VHF, Por último, 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.

2.3.3 Funcionamiento del sistema LMA. Con el sistema LMA se puede realizar el arreglo en 3 dimensiones y el desarrollo en tiempo de una descarga de rayos, usando 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 que se emiten durante las descargas de rayos. En la figura 14 se muestra el esquema de funcionamiento del sistema LMA conformado por 6 estaciones.

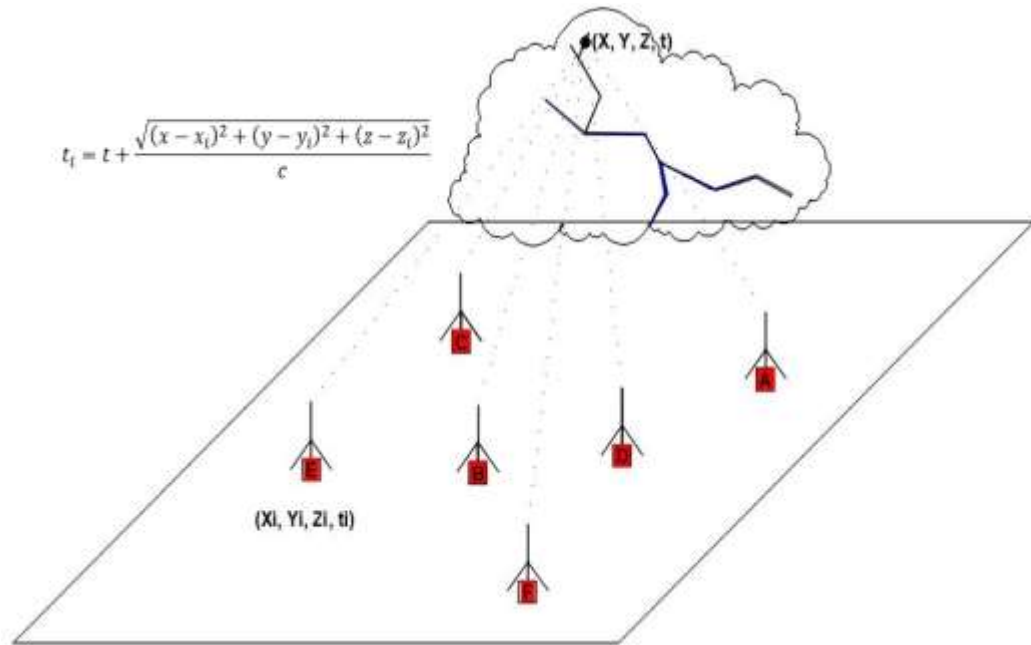
Al medir el tiempo de llegada en cuatro ubicaciones de los impulsos de radiación VHF, es posible encontrar la posición en tres dimensiones de la región fuente. Si el impulso de radiación VHF sucede en la posición (x, y, z) y en el tiempo t , la hora en que se capta la señal en una de las estaciones se puede expresar como se muestra en la ecuación (1).

$$t_i = t + \frac{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2}}{c} \quad (1)$$

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.

El tiempo se obtiene usando receptores GPS.

Figura 14. Esquema de funcionamiento del sistema LMA.



Fuente: Modificada de The New Mexico Tech 3D Lightning Mapping Array. W. Rison, R.J. Thomas, P.R. Krehbiel. 1999)

Para aclarar el proceso hasta la etapa final, los datos se obtienen como se explica en la sección 2.3.2 y se almacenan en los discos duros de cada estación de la red LMA. Luego los datos pasan por una etapa de pre-proceso, para quedar en un formato que permite el uso del software LMA-Zoom-Viewer que se menciona en la sección 2.5.1, donde se visualizan y se analizan los datos.

3. RESULTADOS OBTENIDOS CON LA RED LMA

3.1 EVALUACION DE SITIOS

La imagen 1 muestra la localización geográfica de los puntos proyectados para la instalación de las estaciones LMA, los cuales son:

1. La UIS sede Barrancabermeja.
2. La Cira Infantas.
3. Compresora de gas el Llanito.
4. Campo Casabe.
5. Campo Lizama.
6. Universidad de la paz (Unipaz).

Las pruebas que se realizaron en todos los sitios comprendían cinco aspectos importantes que son:

- Reconocimiento visual del sitio.
- Seguridad, debido al alto costo de los equipos.
- Tomas de energía cercana, para poder energizar los equipos.
- Fácil acceso, para futuras visitas de recolección de datos grabados en los discos duros de cada estación.
- Pruebas con una estación LMA en cada sitio, para verificación del umbral de ruido electromagnético aceptable que no afecte la calidad de las señales recibidas.

Se tuvo en cuenta que el sistema LMA mide fuentes de radio frecuencia entre 60-66 MHz para nuestro caso. Y está calibrado para que en condiciones de buen tiempo (sin tormenta eléctrica) registre entre 1000 y 2000 datos. Cuando se supera

hasta en un 20% este umbral en condiciones de buen tiempo, es decir se reporta 20 veces más datos, se considera que en el sitio existen fuentes de interferencia electromagnética. Para realizar esta prueba se utilizó una estación LMA portátil.

En la figura 15 se puede observar una de las pruebas que se realizó con la estación portátil en la sede de la UIS Barrancabermeja, se eligió la terraza del edificio principal del campus, con el objetivo de que el campo de recepción de la antena quedará libre, buscando la parte más alta posible. La antena se ubicó en diferentes puntos de la terraza y para diferentes condiciones. Para esta prueba se muestra el proceso en detalle y para los otros lugares se resumen los resultados en la tabla 1.

Figura 15. Terraza edificio UIS



Para ingresar al sistema de una estación LMA se conecta un PC al procesador del LMA por medio de cable USB serial o por cable ethernet. En el PC se usa el programa PUTTY para ejecutar los comandos de entrada al sistema que permiten ver el funcionamiento del sensor. Un ejemplo de esto se aprecia en la figura 16, donde se puede observar en pantalla la cantidad de datos por segundo que detecta una estación LMA teniendo en cuenta el nivel de interferencia electromagnética del sitio.

A continuación, se detallan los datos relevantes que se ven en la figura 16.

- A- Fecha del evento
- B- Hora del evento
- C- Umbral de ruido (representado por valor Hexadecimal)
- D- Cantidad de datos por segundo

Figura 16. Resultados mostrados en la pantalla de acceso al Procesador del LMA.

B	05/09/18	21:49:55	010	0x70	-289	549				
B	05/09/18	21:49:56	010	0x70	-290	644				
B	05/09/18	21:49:57	010	0x70	-289	633				
B	05/09/18	21:49:58	010	0x70	-290	547				
B	05/09/18	21:49:59	010	0x70	-290	502	0	pf	34	7.0702 -73.8515 117.15
B	05/09/18	21:50:00	010	0x70	-289	571				
B	05/09/18	21:50:01	010	0x70	-290	555				
B	05/09/18	21:50:02	010	0x70	-289	555				
B	05/09/18	21:50:03	010	0x70	-290	589				
B	05/09/18	21:50:04	010	0x70	-290	781				
B	05/09/18	21:50:05	010	0x70	-290	820				
B	05/09/18	21:50:06	010	0x70	-290	770				
B	05/09/18	21:50:07	010	0x6f	-291	732				
B	05/09/18	21:50:08	010	0x6f	-291	737				
B	05/09/18	21:50:09	010	0x6f	-290	779				
B	05/09/18	21:50:10	temp = 34	cooler off	-290	730				
B	05/09/18	21:50:11	010	0x6f	-291	850	0	pf	34	7.0702 -73.8515 117.15
B	05/09/18	21:50:12	010	0x6f	-290	851				
B	05/09/18	21:50:13	010	0x6f	-290	841				
B	05/09/18	21:50:14	010	0x6f	-291	922				
B	05/09/18	21:50:15	010	0x6f	-291	880				
B	05/09/18	21:50:16	010	0x6f	-291	978				
B	05/09/18	21:50:17	010	0x6f	-291	1076				
B	05/09/18	21:50:18	010	0x6f	-291	990				
B	05/09/18	21:50:19	010	0x6f	-291	994				
B	05/09/18	21:50:20	temp = 34	cooler off	-292	1017				
B	05/09/18	21:50:21	010	0x6f	-291	1010				
B	05/09/18	21:50:22	010	0x6f	-290	937				
B	05/09/18	21:50:23	010	0x6f	-291	832	0	pf	34	7.0702 -73.8515 117.15
B	05/09/18	21:50:24	010	0x6f	-291	789				
B	05/09/18	21:50:25	010	0x6f	-291	811				
B	05/09/18	21:50:26	010	0x6f	-291	756				
B	05/09/18	21:50:27	010	0x6f	-292	729				
B	05/09/18	21:50:28	010	0x6f	-292	792				
B	05/09/18	21:50:29	010	0x6f	-291	742				
B	05/09/18	21:50:30	010	0x6f	-291	739				
B	05/09/18	21:50:31	010	0x6f	-291	718				
B	05/09/18	21:50:32	010	0x6f	-292	846				
B	05/09/18	21:50:33	010	0x6f	-292	800				
B	05/09/18	21:50:34	010	0x6f	-291	783				
B	05/09/18	21:50:35	temp = 34	cooler off	-293	710	0	pf	34	7.0702 -73.8515 117.15
B	05/09/18	21:50:36	010	0x6f	-291	805				
B	05/09/18	21:50:37	010	0x6f	-292	732				
B	05/09/18	21:50:38	010	0x6f	-291	647				
B	05/09/18	21:50:39	010	0x6f	-291	756				

Las pruebas realizadas se describen a continuación

Prueba 1. Instalación de la antena lo más alejada de aires acondicionados cuando solo se encuentra uno encendido.

Prueba 2. Antena en la misma posición que en la prueba 1 pero con los aires acondicionados totalmente apagados.

Prueba 3. Antena ubicada en el centro de la azotea con una distancia a los aires acondicionados entre 4 y 10 metros, con la mayoría apagada.

Prueba 4. En la base de una antena una antena de comunicación de aproximadamente 20 metros de altura en Casabe.

Prueba 5. En las instalaciones del casino de empleados en Casabe.

Prueba 6. Se realizó en las oficinas de La Cira.

Prueba 7. Esta prueba se realizó en el campamento de los electricistas en la Cira.

Prueba 8. En la oficina de Control de la Planta de Compresión de gas del Llanito.

Prueba 9. En cercanías de las oficinas de Campo Petrolero Lizama.

Prueba 10. La prueba se realizó en el laboratorio de biología de la unipaz.

En la siguiente tabla se muestra un resumen de las pruebas realizadas.

Tabla 1. Resultados pruebas

Prueba	Lugar	Umbral	Muestras
1	UIS Barrancabermeja	6F	500-1000
2	UIS Barrancabermeja	6B	1000-2000
3	UIS Barrancabermeja	72	1000-2000
4	Casabe Torre	70	1000-2000
5	Casabe casino	57	1000-2000
6	La Cira oficinas	74	1000-2000
7	La Cira campamento	6C	1000-2000
8	El Llanito	6B	1000-2000
9	Lizama	6C	1000-2000
10	UNIPAZ	38	1000-2000

Lo ideal es que el valor para el umbral de ruido se encuentre entre 0x50 - 0x55, capturando un numero de muestras entre 1000 y 2000. Debido a la interferencia electromagnética se observa que en todos los lugares el umbral de ruido hay que llevarlo hasta el límite para poder establecer el margen de las muestras entre 1000 y 2000. Aunque el umbral no es el ideal, es aceptable para la instalación de las estaciones.

3.2 EJEMPLOS DE EPISODIOS DE TORMENTA

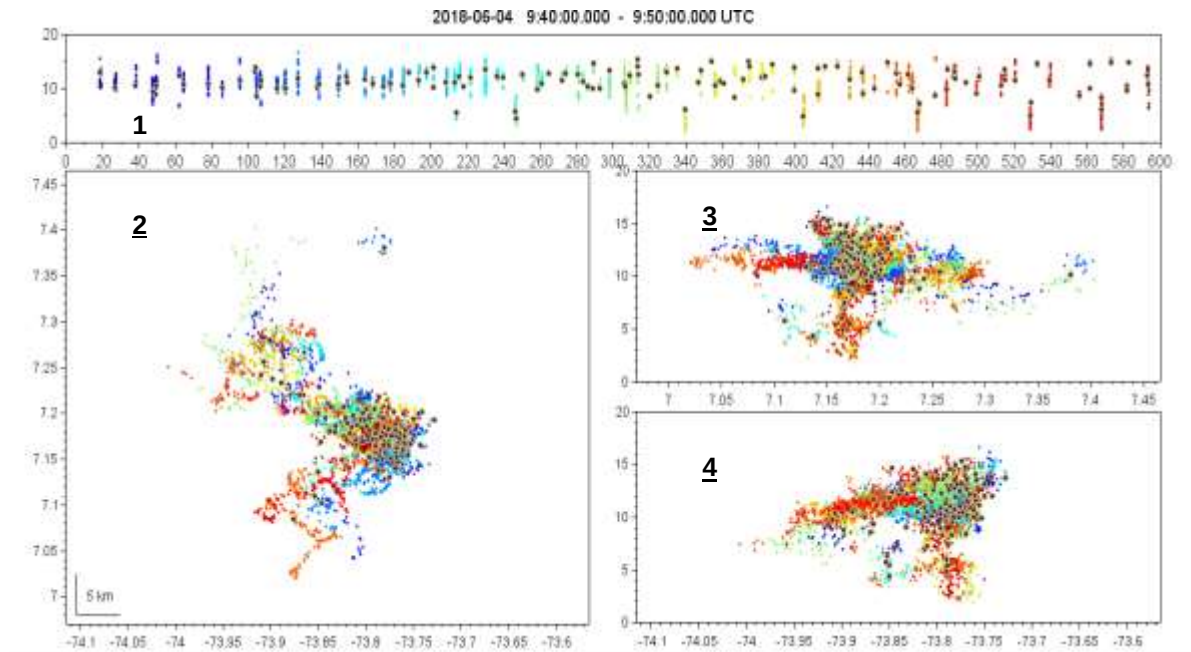
La red LMA instalada en Barrancabermeja se puso en funcionamiento a finales de mayo del 2018, se han recolectado datos en 4 ocasiones durante el año 2018 y en 2 ocasiones en lo que va del año 2019. Los ejemplos que se muestran a continuación, hacen parte de los primeros resultados del desarrollo de tormentas eléctricas con un sistema LMA en una zona tropical de América del sur.

3.2.1 Programa para visualización de datos de salida de la red LMA. Para poder visualizar los datos de salida del sistema LMA, se usó el programa *LMA Zoom-Viewer* desarrollado en la UPC (Universidad Politécnica de Cataluña) por el grupo de investigación Lightning Research Group (LRG), el cual permite analizar de forma temporal y espacial el desarrollo de los rayos.

Como ya se ha mencionado el sistema detecta impulsos de radiación de VHF, este tipo de frecuencias están asociadas a la fase del líder escalonado del rayo.

3.2.2 Ejemplo 1: Tormenta 4 de junio del 2018, 9:40-9:50 UTC. La figura 17 muestra un evento en una ventana de 10 minutos de duración y se compone de 4 paneles, el panel superior (1) representa la altura en km en función del tiempo en segundos, el panel inferior izquierdo (2) indica la vista de planta en latitud (*1° de latitud es aproximadamente 111 km*) en función de la longitud (*1° de longitud es aproximadamente 106 km*), el panel superior derecho (3) representa la altitud en km en función de la latitud y el panel inferior derecho representa la altitud en km en función de la longitud.

Figura 17. Tormenta 4 de junio del 2018.

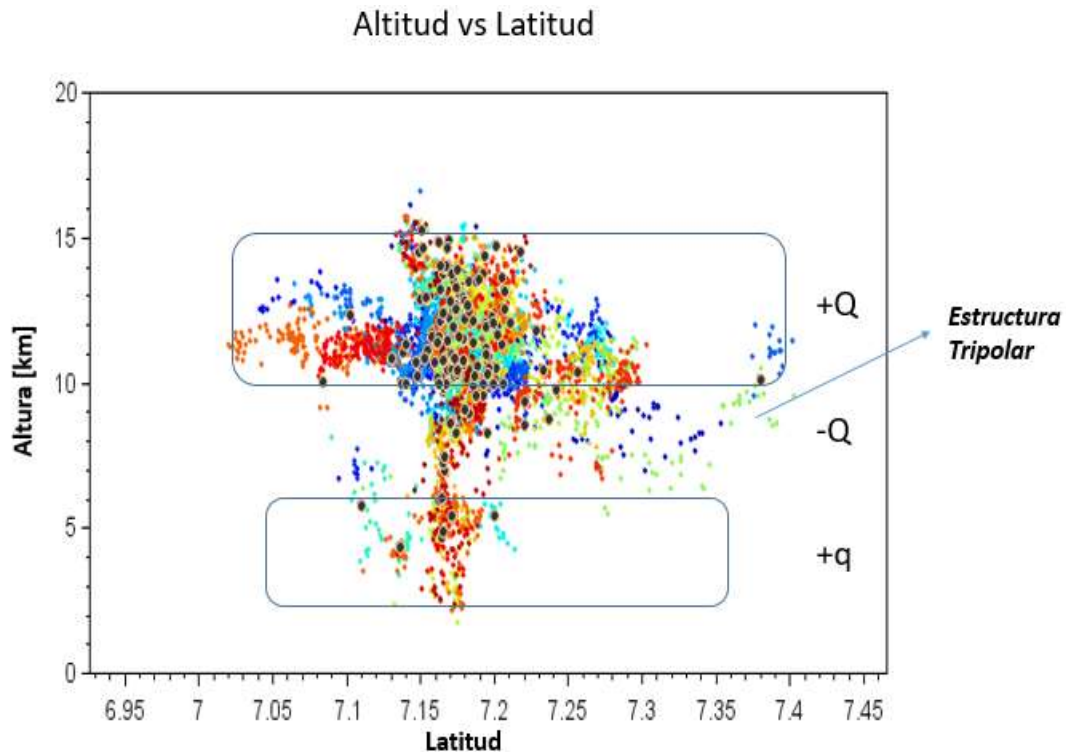


Las figuras 18, 19, 20 y 21 que se muestran a continuación, son un desglose del evento de tormenta del 4 de junio del 2018 mostrado en la figura 17.

Para la figura 18, donde se aprecia la altitud en km en función de la latitud, se puede sugerir que para la ventana de 10 minutos la tormenta presenta una estructura Tripolar, según (Wiens, 2005)²³ la altitud de las fuentes da una idea de la estructura de carga de la nube. Para este caso la mayor cantidad de fuentes de LMA se concentraron en la parte superior de la nube, entre 11 y 15 km de altura, sugiriendo entonces que es la región de carga positiva superior de la nube. En la parte media, entre 6 y 10 km de altura se encuentra una menor densidad de fuentes, lo que sugiere una región de carga negativa de nivel medio. Entre 3 y 6 km se encuentran muy pocas fuentes, lo que indica la carga positiva inferior de la nube.

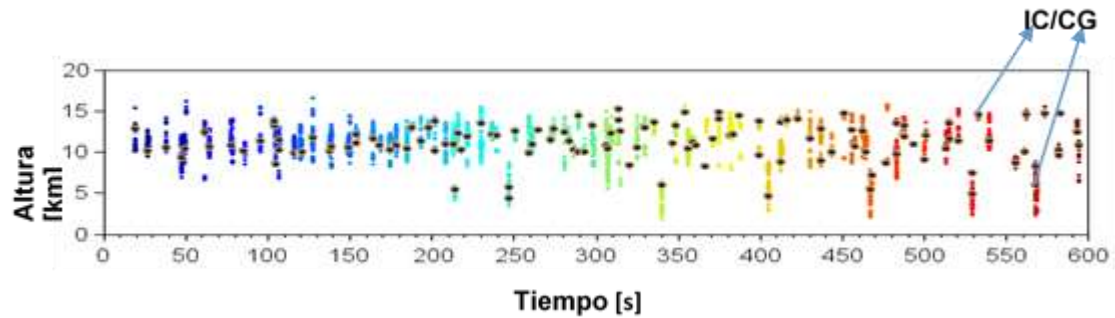
²³ WIENS, K. C., S. A. Rutledge, and S. A. Tessendorf, 2005: The 29 June 2000 supercell observed during STEPS. Part II: Lightning and charge structure. *J. Atmos. Sci.*, **62**, 4151–4177.

Figura 18. Estructura tripolar de la tormenta 4 de junio del 2018.



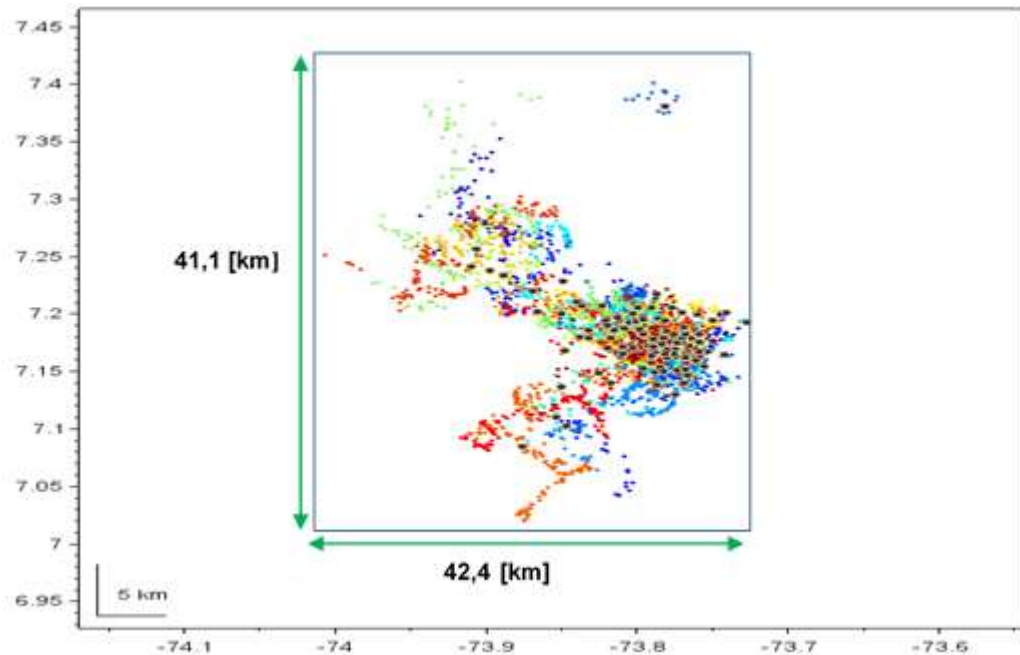
Para la figura 19 del panel altitud vs tiempo, los puntos negros representan el origen del rayo. La descarga se inicia cuando entre las regiones de carga positiva y negativa el campo eléctrico es demasiado fuerte. Luego la descarga se propaga en direcciones opuestas al origen del rayo, tomando una dirección de desarrollo negativa, también llamada líder negativo y una dirección de desarrollo positiva, también llamada líder positivo. Esto se aprecia en la gráfica 4 donde los puntos de origen de rayo tienen un desarrollo bidireccional, estos pueden ser IC (Intra-Cloud o Intra-Nube) y CG (Cloud-Ground o Nube-Tierra). El desarrollo bidireccional del rayo no tiene implicación en la clasificación CG o IC.

Figura 19. Panel de altura Vs tiempo



La figura 20 muestra la vista de planta donde se aprecia que la tormenta tiene un área de aproximadamente $41,1 \times 42,4 \text{ km}^2$.

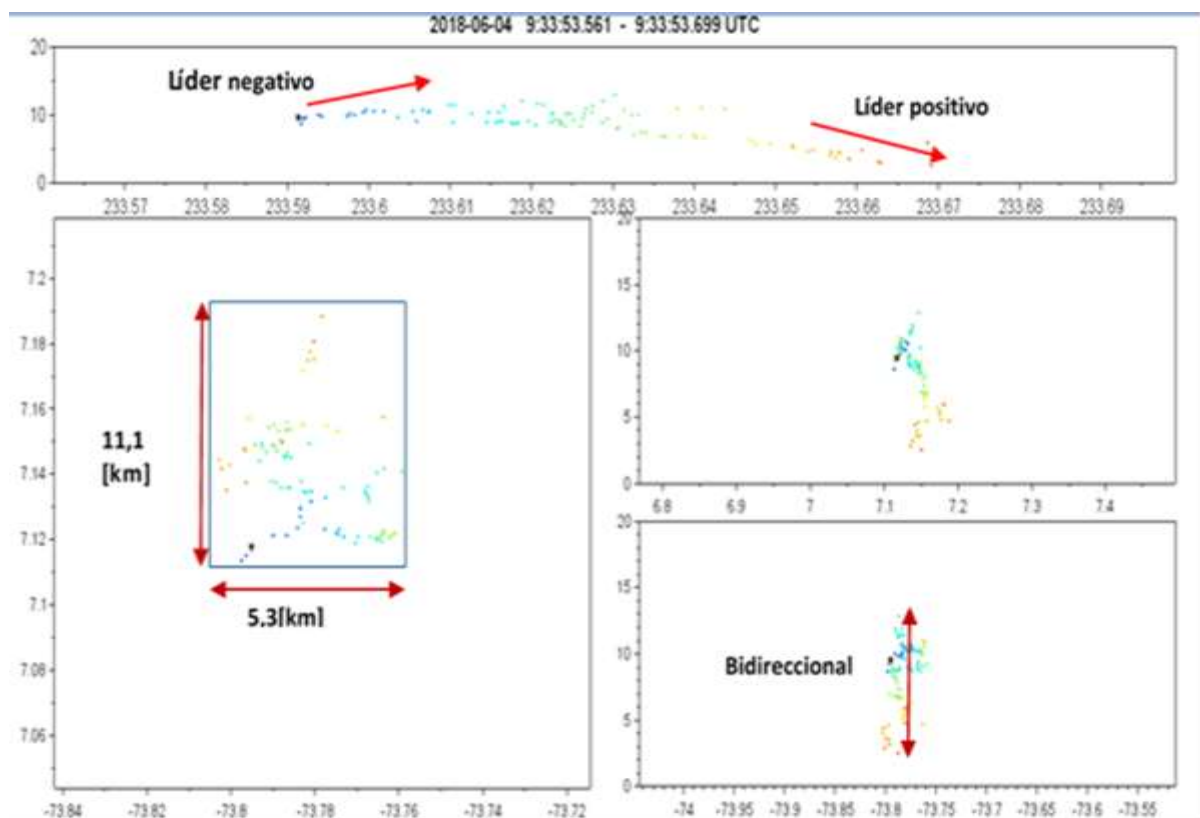
Figura 20. Panel de planta (latitud vs longitud)



3.2.2.1 Rayo individual IC (Intra-nube). En la figura 21, se muestra el comportamiento de un rayo bidireccional intra-nube que se inició a 10 km de altura con una duración de 8 ms. El rayo tiene un área aproximada de 11.1 por 5.3 kilómetros y un recorrido vertical de 12 kilómetros. El programa (ver sección 2.5.1)

permite conocer la altura aproximada de las fuentes, con lo cual se podría calcular la distancia desde la fuente más baja detectada hasta tierra, para este caso la altura de la fuente más baja se encuentra a aproximadamente 2.6 kilómetros de altura, por simple inspección se diría que el rayo es intra-nube, pero no se puede asegurar esto, ya que el LMA tiene una región de sombra que no permite ver las fuentes que se encuentran aproximadamente por debajo de 1 kilómetro de altura.

Figura 21. Rayo Bidireccional

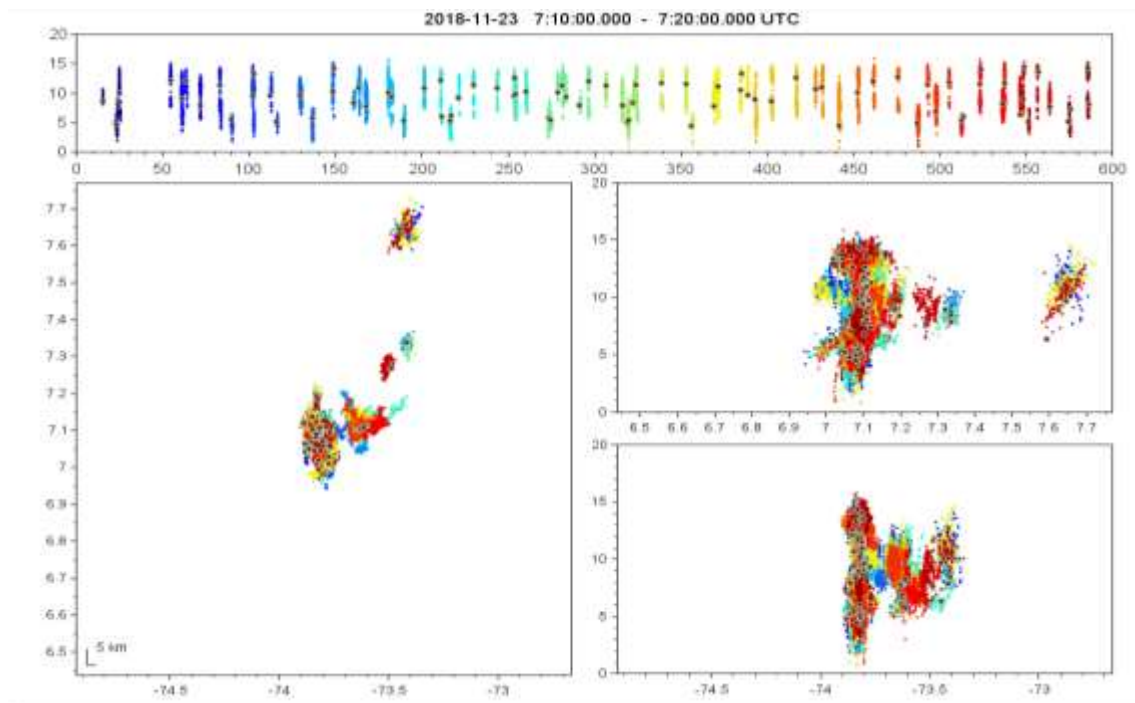


3.2.3 Ejemplo 2: Tormenta 23 de noviembre del 2018 A continuación, se muestra un ejemplo de tormenta del 23 de noviembre del 2018, para este caso se mostrarán gráficos en 2D (Dos dimensiones), que muestran tiempo, distancia horizontal y altitud, este método fue utilizado por *Van der Velde y Montanya (2013)*. El método permite conocer el valor aproximado de las velocidades radiales de los líderes usando pendientes de referencia (ver figura 24), los valores de estas pendientes

son $2 \times 10^4 \frac{m}{s}$ **(1)**, que corresponde a valores de velocidad aproximada para líderes positivos $1 \times 10^5 \frac{m}{s}$ **(2)** y $1 \times 10^6 \frac{m}{s}$ **(3)**, para velocidades de líderes negativos rápidos y muy rápidos respectivamente. En los siguientes ejemplos se mostrará en detalle.

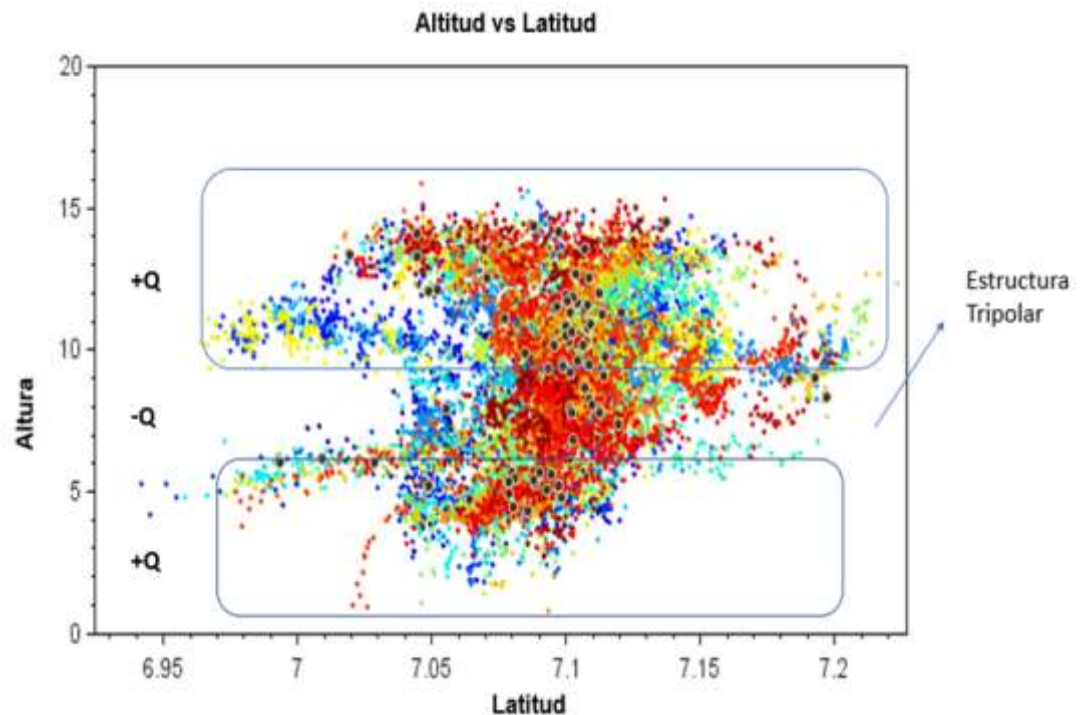
En la figura 22 se muestran 10 minutos de tormenta del día 23 de noviembre del 2018, donde se detectaron 17375 fuentes y 89 puntos de origen de rayo. Se aclara que el origen del rayo son los puntos negros y las fuentes son los puntos de colores que se propagan desde dichos puntos negros, esto se aprecia claramente en el panel superior de la figura 22. En el panel inferior derecho de altura versus longitud se observan fuentes que están a menos de 1 km de altura, lo que puede indicar algún impacto a tierra o sobre alguna estructura. A continuación, vamos a observar algunos de estos rayos de forma individual en el grafico en 2D, para seguir el desarrollo en altitud e indicar las velocidades aproximadas y conocer el tipo de líder.

Figura 22. Tormenta 23 de noviembre 2018



Para la figura 23, se puede sugerir que la tormenta del 23 de noviembre del 2018 presenta una estructura tripolar, siguiendo el método por inspección mencionado en el ejemplo 1, con la altitud de las fuentes se puede tener una idea de la estructura de carga de la nube, aunque no es tan preciso. En este caso la mayor cantidad de fuentes de LMA se concentraron en la parte superior de la nube, entre 10 y 15 km de altura, proponiendo entonces que es la región de carga positiva superior de la nube. En la parte media, entre 6 y 10 km de altura se encuentra una menor densidad de fuentes, lo que sugiere una región de carga negativa de nivel medio. Entre 2 y 6 km se encuentran muy pocas fuentes, lo que indica la carga positiva inferior de la nube.

Figura 23. Estructura tripolar de la tormenta 23 de noviembre del 2018.

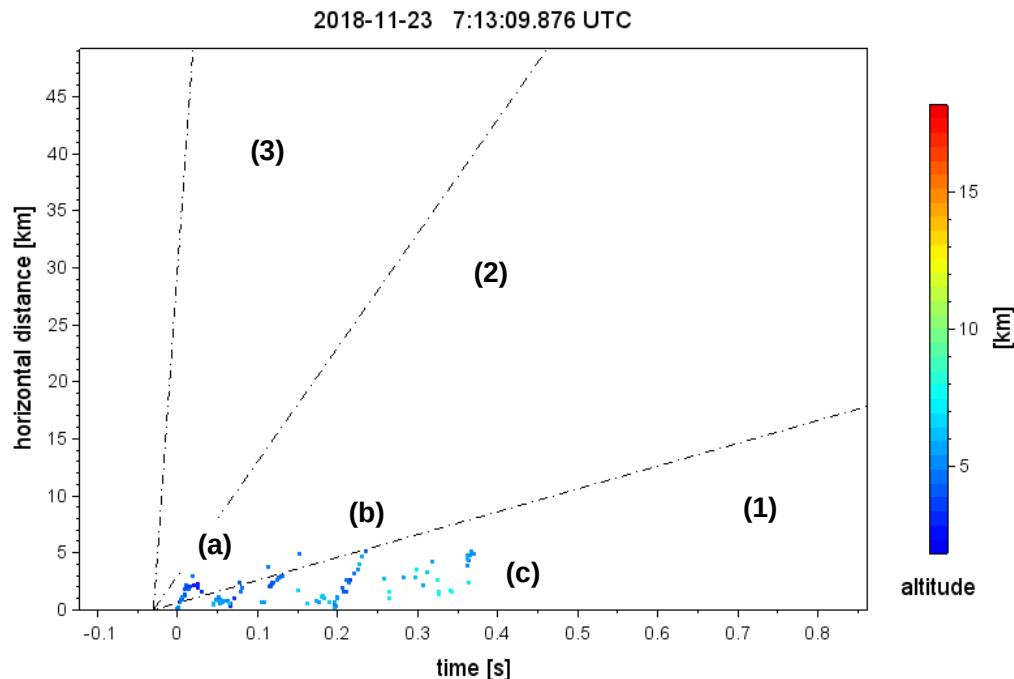


Los rayos individuales mostrados desde la figura 24 hasta la 32, se graficaron en la ventana de 2D de tiempo, distancia horizontal y altitud. El tiempo se representa en segundos, la distancia en kilómetros y la barra de colores a la derecha de la imagen

permite conocer la altitud en km por color de las fuentes. Los valores de velocidad asociados a las líneas punteadas no son los valores reales de velocidad en 3 dimensiones (3D), pero si es un valor cercano.

3.2.3.1 Rayos con origen por debajo de 8 kilómetros El rayo se inició a 5.3 km de altura aproximadamente, en la figura 24 el origen se marca a los cero segundos, iniciando un líder negativo **(a)**, con un desarrollo horizontal de 3 km y descendiendo a 3.5 km de altitud. La velocidad del líder se asocia a la pendiente de $1 \times 10^5 \frac{m}{s}$. Se inicia un nuevo líder negativo a 200 milisegundos **(b)**, del origen con 5 km de desplazamiento horizontal y un ascenso de 2 km de altura. Los puntos de color azul más claro que están dispersos con alturas entre 7 y 8 km **(c)**, están asociados a velocidades de líder positivo $2 \times 10^4 \frac{m}{s}$, y representan el proceso de retroceso en el desarrollo del rayo. Pero aquí solamente se verifican las altitudes de las fuentes que conforman los pasos del desarrollo de los líderes que estén más cercanas a tierra.

Figura 24. Rayo a 5.3 km de altura



Para el caso de la figura 25, el rayo se inició a 4.9 km de altura aproximadamente, es un líder negativo de $1 \times 10^5 \frac{m}{s}$ de velocidad **(a)**, se observa al final una fuente de color azul muy oscuro, lo que indica que estuvo a menos de 1 kilómetro del suelo. Para corroborar esta información se realizó la animación de este rayo, exportando los datos desde el programa LMA-Zoom Viewer a un archivo de texto, y luego convirtiéndolos a un archivo (kml), para poder visualizarlos en Google Earth. De esta forma se pueden apreciar las fuentes del rayo en 3 dimensiones sobre el mapa donde se encuentran ubicadas las estaciones del LMA (figura 26), conociendo así la altura de las fuentes al suelo por medio de las opciones del programa Google Earth. Para este caso la altura de la fuente más cercana a tierra es de 956 metros.

Figura 25. Rayo a 4.9 km de altura.

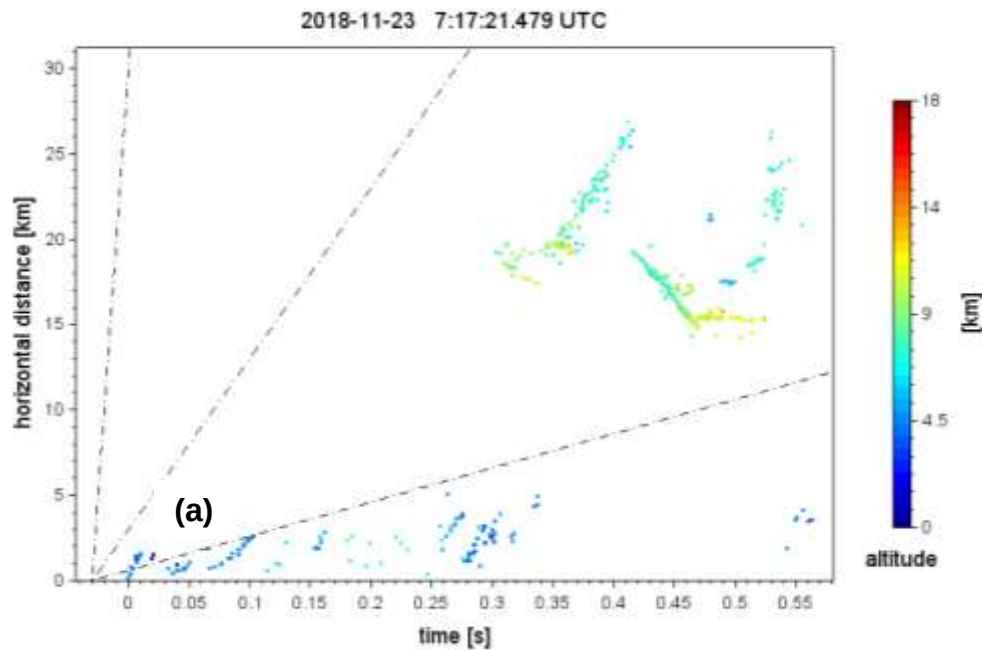
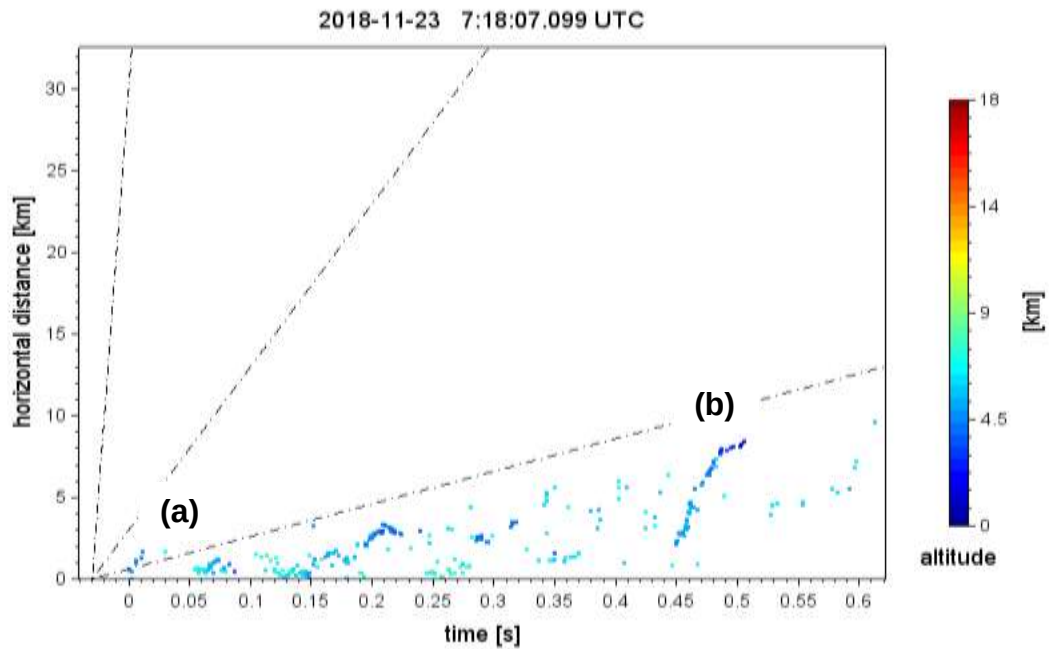


Figura 26. Fuente de rayo a 956 metros del suelo.



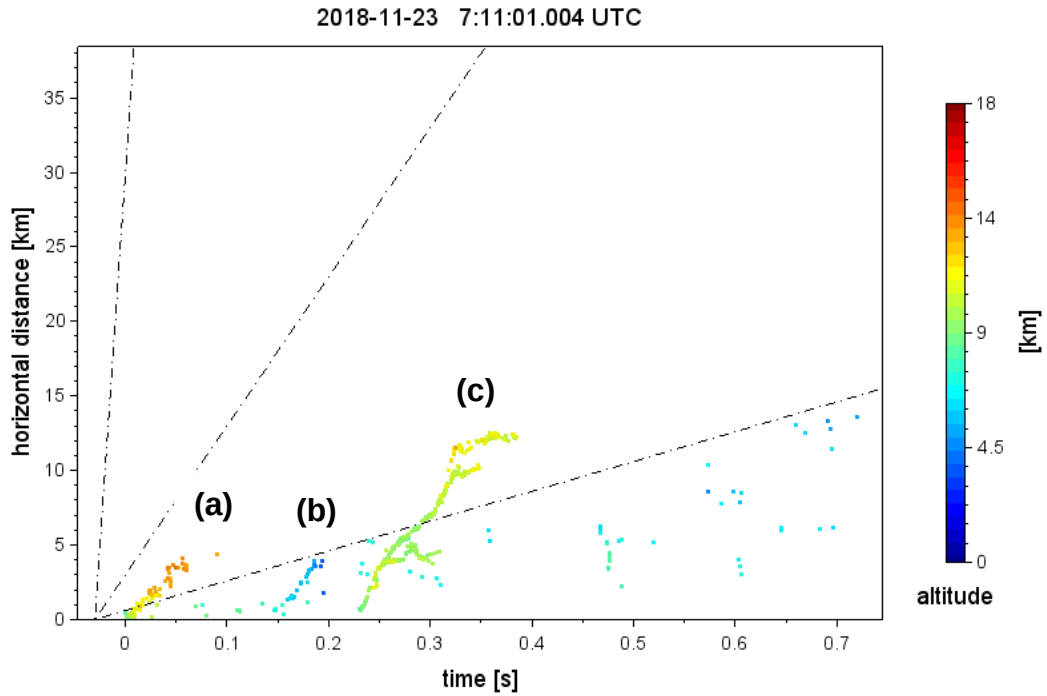
En la figura 27 se detecta un líder corto **(a)** al inicio de 2 km de desplazamiento, con unas pocas fuentes que están asociadas a la velocidad de líder negativo de $1 \times 10^5 \frac{m}{s}$. Luego se observa el desarrollo de un líder negativo rápido **(b)** que se inició a 450 milisegundos del origen, con un desplazamiento horizontal de 5 km y que desciende a una altura aproximada de 1.1 km.

Figura 27. Rayo a 2 km de altura



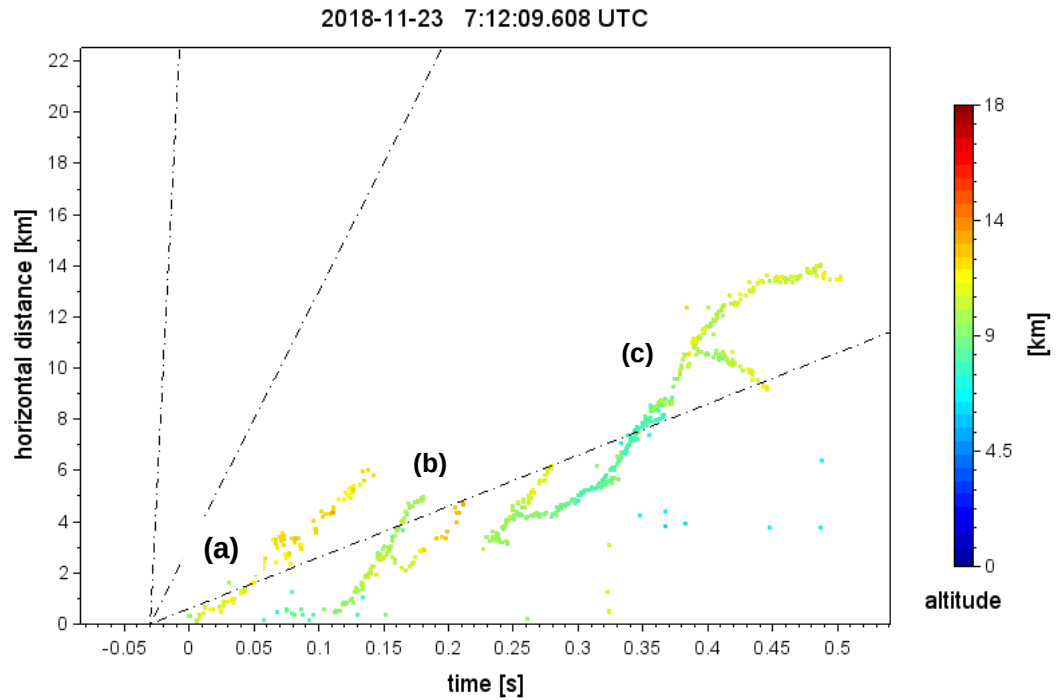
3.2.3.2 Rayos con origen entre 9 y 11 kilómetros de altura . Para la figura 28 el rayo **(a)** se inició con un líder negativo de $1 \times 10^5 \frac{m}{s}$ a 9.5 km de altura, se desplazó horizontalmente 4 km y ascendió a 13 km de altura. A 150 milisegundos **(b)** se detecta un nuevo líder negativo a 8 km de altura y desciende a 4 km aproximadamente. Luego a 230 milisegundos se inicia **(c)** un líder negativo que se extiende horizontalmente a casi 13 km y asciende a 12.5 km altura.

Figura 28. Rayo a 9.5 km de altura



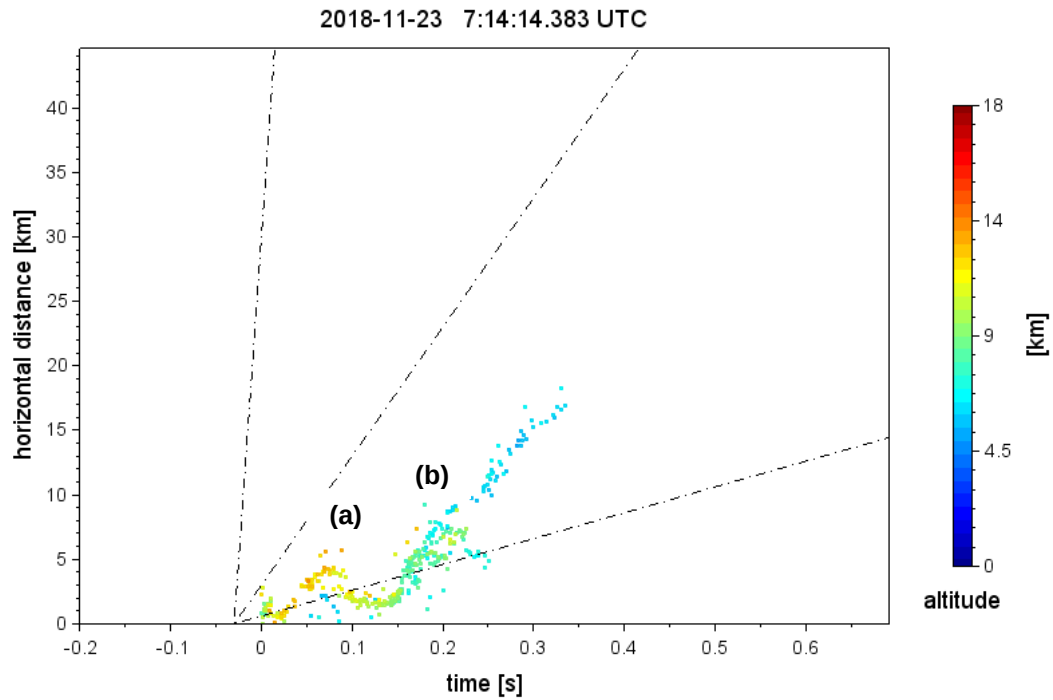
En la figura 29 se inicia **(a)** un líder positivo a 10.5 km de altura y que se desplaza 1 km a una velocidad de $2 \times 10^4 \frac{m}{s}$, luego aumenta su velocidad a $1 \times 10^5 \frac{m}{s}$ aproximadamente, asociada a la pendiente del líder negativo. En total desde el origen se extiende a 6.5 km y asciende a 12 km de altura. A 110 milisegundos aparece **(b)** un nuevo líder negativo a 8.5 km de altura, luego a 3 km de distancia horizontal se desprende un nuevo líder negativo que asciende a 13 km de altura. A 215 milisegundos del origen y 9 km de altura, se inicia **(c)** un líder negativo de $1 \times 10^5 \frac{m}{s}$, del cual se desprende un líder positivo de $2 \times 10^4 \frac{m}{s}$, durante 80 milisegundos y a 8 km de altura, luego aumenta su velocidad asociándose a la pendiente de líder negativo rápido que asciende a 11 km de altura y que termina con dos ramificaciones a 12 km de altura con velocidad de líder negativo.

Figura 29. Rayo a 10.5 km de altura



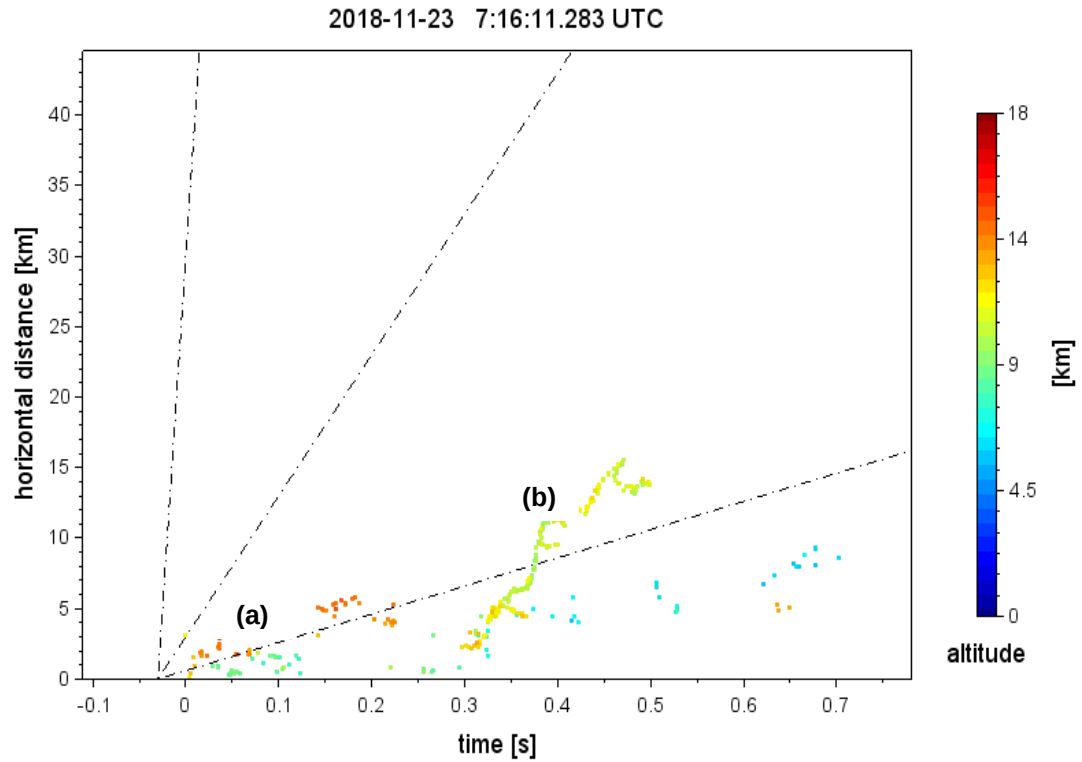
En la en la figura 30 se observa **(a)** un líder negativo rápido que inicio a 10 km de altura y ascendió a 13 km, luego de un descenso, se inicia **(b)** un nuevo líder negativo a 113 milisegundos del origen y a una altura de 9 km, con una velocidad de $1 \times 10^5 \frac{m}{s}$ y un desplazamiento horizontal de 20 km, este líder tuvo un descenso hasta 4.5 km de altura.

Figura 30. Rayo a 10 km de altura



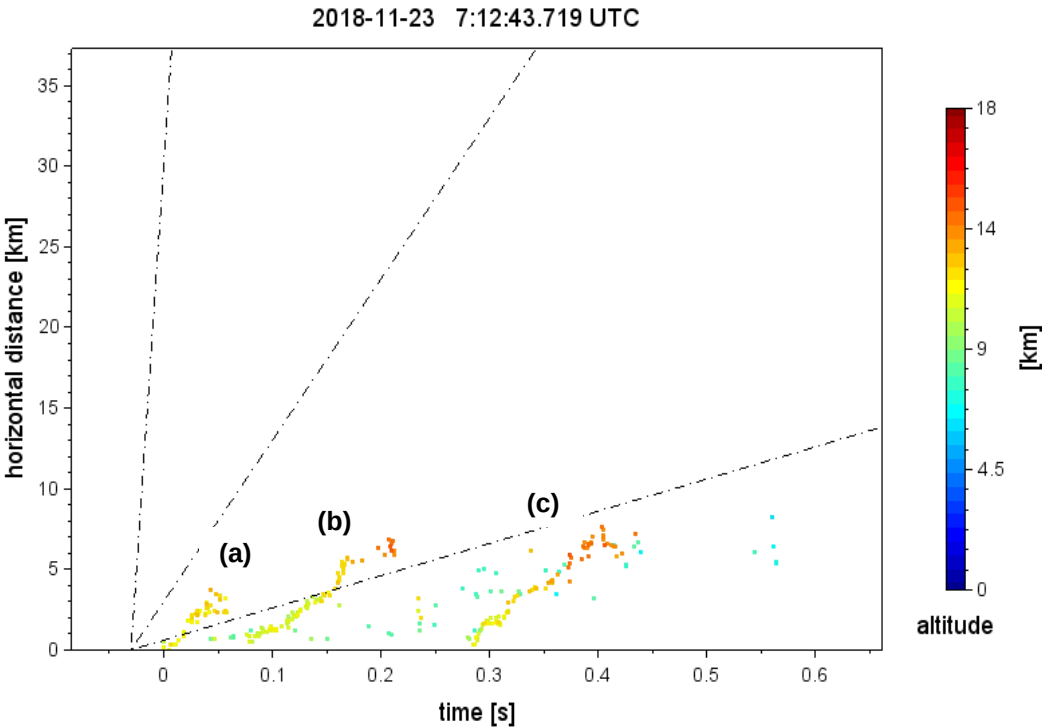
3.2.3.3 Rayos con origen entre 11 y 15 km de altura. Para la figura 31, la primera fuente se detectó a 11.8 km de altura, seguida de **(a)** varias fuentes dispersas asociadas a la velocidad de líder positivo de $2 \times 10^4 \frac{m}{s}$. A 300 milisegundos del origen se inicia **(b)** un líder negativo rápido, a 13 km de altura y que desciende a 10 km aproximadamente.

Figura 31. Rayo a 11.8 km de altura



En la figura 32 se inicia **(a)** un rayo a 11.3 km de altura, con una velocidad asociada al líder negativo de $1 \times 10^5 \frac{m}{s}$. A 80 milisegundos del origen se detecta **(b)** un líder positivo de $2 \times 10^4 \frac{m}{s}$, que se desplaza horizontalmente 4 km y dura en total 70 milisegundos, en este mismo instante se inicia un líder negativo que asciende a 14 km de altura. Por último, se inicia **(c)** un líder negativo a 12 km de altura y que asciende hacia la parte superior de la nube a 14.5 km aproximadamente.

Figura 32. Rayo a 11.3 km de altura



4. CONCLUSIONES

1. Las características para la instalación de las estaciones, debieron ser zonas de fácil acceso, lejos de torres de comunicación, transformadores, aires acondicionados, entre otros que suelen generar interferencia electromagnética, buena cobertura satelital para el acceso a internet y servicio de red eléctrica para la conexión de los equipos, algunos de los lugares no cumplieron estas condiciones.
2. Debido a que los lugares presentaron alto nivel de interferencia electromagnética, no se pudo cumplir con el umbral de ruido ideal, pero se garantizó que cada estación tuviera una recepción de entre 1000 y 2000 datos por segundo, en ambiente sin tormenta eléctrica, bajo estas condiciones se procedió a la instalación de los sensores que conforman la red LMA.
3. La instalación de la red LMA en Barrancabermeja Santander, hace parte de los primeros estudios usando un sistema de alta resolución para el mapeo de tormentas eléctricas en América del Sur. Su puesta en marcha permite la posibilidad de complementar información con otros sistemas de monitoreo para la caracterización de tormentas, el análisis de impactos de rayos sobre estructuras elevadas y la mejora en la protección de sistemas eléctricos.
4. Los ejemplos de tormenta mostrados sugieren que la totalidad de las fuentes de rayos captadas por la red LMA, formaron líderes que se desarrollaron en intra-nube, ya que se encontraron en alturas superiores a un kilómetro. Pero en realidad el sistema LMA presenta inconvenientes para detectar fuentes por debajo de esta altura, debido a que tiene una región de sombra que afecta la eficiencia en la detección, para mejorar esta información se deben integrar los

resultados del LMA con los de otros sistemas de medida y monitoreo para definir cuales rayos fueron intra-nube y nube-tierra.

5. Los ejemplos de rayos individuales mostrados en las gráficas de distancia horizontal-tiempo, permitieron evidenciar que la mayoría de las fuentes detectadas por el sistema LMA son de líderes negativos, pero también se logran detectar fuentes más débiles que pertenecen al desarrollo de líderes positivos.

BIBLIOGRAFÍA

BARTH, M., et al. The Deep Convective Clouds and Chemistry (DC3) field campaign, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 96, 2015 1281–1309, doi:10.1175/BAMS-D-13-00290.1.

GÓMEZ J.C. y MORCOS, M.M. “Voltage Sag and Recovery Time in Repetitive Events,” *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 17, N.º 4, 2002 pp. 1037-1043.

KOSHAK, W. J., H. S. PETERSON, E. W. MCCAUL, AND A. BIAZAR Estimates of the lightning NO_x profile in the vicinity of the North Alabama Lightning Mapping Array, paper presented at 3rd International Lightning Meteorology Conference, Vaisala, Orlando, Fla., 21–22 April. 2010

KREHBIEL PR.. The DC Lightning Mapping Array. New Mexico Tech, Socorro, NM. http://www.lightning.nmt.edu/nmt_lms/

KREHBIEL, P. R., R. J. THOMAS, W. RISON, T. HAMLIN, J. HARLIN, AND M. DAVIS,: Lightning mapping observations in central oklahoma. *Earth Obs. Systems*, In Press. 2005

LÓPEZ Jesús A., MONTANYÀ Joan, VAN DER VELDE Oscar A., PINEDA Nicolau, SALVADOR Albert, ROMERO David, ARANGUREN Daniel, TABORDA John, . Charge Structure of Two Tropical Thunderstorms in Colombia. 2019 American Geophysical Union, doi: 10.1029/2018JD029188

LÓPEZ Jesús Alberto, MONTANYÀ Joan, VAN DER VELDE Oscar, ROMERO David First data of the Colombia Lightning Mapping Array – COLMA. *Preprint of the: 2016 International Conference on Lightning Protection (ICLP)*. 2016

MAIER, L., C. LENNON, T. BRITT, AND S. SCHAEFER, *LDAR system performance and analysis*, paper presented at International Conference on Cloud Physics, Am. Meteorol. Soc, Dallas, Tex., Jan. 1995.

PROCTOR, D. E., A hyperbolic system for obtaining VHF radio pictures of lightning, *J. Geophys. Res.*, 76, 1478-1 489, 1971

RISON, W, R. J. THOMAS, P. R. KREHBIEL, T. HAMLIN, J. HARLIN, AND M. DAVIS. GPS-based mapping system reveals lightning inside storms: *EOS*, Vol. 81, No. 3, January 18, 2000.

RISON, W., R. J. THOMAS, P. R. KREHBIEL, T. HAMLIN, AND J. HARLIN A GPS-based three-dimensional lightning mapping system: Initial observations in central New Mexico, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 1999 3573–3576, doi:10.1029/1999GL010856.

TORRES H. El rayo. Mitos, leyendas, ciencia y tecnología. 2002

VAN DER VELDE, O. A.; MONTANYÀ, J.; ROMERO, D.; PINEDA, N.; SOULA, S. Ebro Lightning Mapping Array: sprite-producing lightning and ground-to-cloud-to-ground flashes. 2014

VAN DER VELDE, O. A.; MONTANYÀ. Asymmetries in bidirectional leader development of lightning flashes. 2013

WEISS STEPHANIE A., RUST W. DAVID AND MACGORMAN DONALD R.,
BRUNING ERIC C., KREHBIEL PAUL R., Evolving Complex Electrical Structures of
the STEPS 25 June 2000 Multicell Storm.

WIENS, K. C., S. A. Rutledge, and S. A. Tessendorf, 2005: The 29 June 2000
supercell observed during STEPS. Part II: Lightning and charge structure. *J. Atmos.
Sci.*, **62**, 4151–4177.