

Análisis de las mediciones de un equipo diseñado para registrar corrientes de rayo en Barrancabermeja - Santander, utilizando las redes de localización de rayos LINET y LMA, en el periodo 2018-2019

Analysis of the measurements of a device designed to register lightning currents in Barrancabermeja – Santander, using the lightning locations systems LINET and LMA in the 2018-2019 period

Edinson Andrés Soto-Ríos ^{1a}, Genny Esmeralda Burbano-Burbano ^{1b}, Wilfred Yesid García- Gómez ^{1c}

¹ Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica – Gisel, Universidad Industrial de Santander, Colombia. Orcid: ^a 0000-0001-6039-1769, Correos electrónicos: ^a easotor@uis.edu.co, ^b genny.burbano@correo.uis.edu.co, ^c yesid.garcia@correo.uis.edu.co

Recibido: 19 noviembre, 2019. Aceptado: 15 junio, 2020. Versión final: 26 agosto, 2020.

Resumen

Este trabajo presenta el análisis de los registros adquiridos más importantes, durante un periodo de cuatro meses, de un equipo de medición de corriente de rayo instalado en Barrancabermeja – Colombia. Se enseña inicialmente la instrumentación necesaria para adquirir las señales de corrientes y se evidencia la obtención de un total de 68 señales que se entran a analizar. Con el fin descartar eventos que no correspondieran a rayos, las mediciones se compararon con los registros de la Red Colombiana de Detección Total de Rayos con tecnología LINET, y para establecer si correspondían a impactos directos se contrastan con los datos suministrados por la red DABEIBA-LMA (Lightning Mapping Array) ubicada en la misma ciudad de instalación del equipo. Con base en lo anterior, se logran establecer los eventos que corresponden a perturbaciones externas o a eventos producidos por rayos cercanos. En este artículo, de acuerdo con los resultados obtenidos, se encontró que los registros debidos a rayos corresponden a tensiones inducidas originadas por eventos intra-nubes.

Palabras clave: análisis; comparación; corriente; equipo; rayo; medición.

Abstract

This work presents the analysis of the most important acquired signals, during a period of four months, of a lightning current measurement equipment installed in Barrancabermeja - Colombia. Initially, the required instrumentation to acquire the current signals is shown and a total of 68 signals are obtained. In order to discard events that did not

ISSN impreso: 1657 - 4583. ISSN en línea: 2145 – 8456, **CC BY-ND 4.0** 

Como citar: E. Soto, G. Burbano, Y. García, “Análisis de las mediciones de un equipo diseñado para registrar corrientes de rayo en Barrancabermeja - Santander, utilizando las redes de localización de rayos LINET y LMA, en el periodo 2018-2019,” *Rev. UIS Ing.*, vol. 19, no. 4, pp. 199-212, 2020, doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v19n4-2020017>

correspond to lightning, the measurements were compared with the strokes measured by the Colombian Network for Total Lightning Detection with LINET technology, and to establish whether those corresponded to direct impacts, were contrasted with the data provided by the DABEIBA-LMA (Lightning Mapping Array) network, located in the same city where the equipment is installed. Based on the above, it is possible to establish the events that correspond to external disturbances or to events produced by nearby strikes. In this article, according to the obtained results, it was found that the measurements due to lightning correspond to induced voltages caused by intra-cloud events.

Keywords: analysis; comparison; current; equipment; lightning; measurement.

1. Introducción

Las investigaciones acerca del comportamiento de los fenómenos atmosféricos iniciaron con Benjamín Franklin quien demostró mediante su famoso experimento de la cometa y la botella de Leyden, que las nubes de tormenta están cargadas eléctricamente [1]. Con el pasar de los años, las investigaciones relacionadas a los fenómenos atmosféricos han aumentado debido al gran impacto que generan en la vida cotidiana, siendo estos los responsables de cientos de muertes, así como los principales causantes de fallas en el sistema eléctrico [2]-[4]; estas investigaciones incluyen mediciones alrededor del mundo de diferentes parámetros del rayo, especialmente, la corriente de la descarga retorno [1][5].

La corriente del rayo se puede medir de forma indirecta y directa. La forma indirecta se realiza por medio de redes localizadores de rayos que permiten estimar la corriente pico con base en el campo electromagnético medido a través de fórmulas conocidas [6][7]. La forma directa permite la medición en el punto donde ocurre el impacto, a través de dispositivos instalados en su gran mayoría en torres instrumentadas de gran altura, obteniendo resultados más precisos de la forma de onda de la descarga atmosférica. La primera persona en experimentar con la medición directa de corriente de rayos fue McEachron en 1939, quien obtuvo una señal de corriente en el edificio Empire State en New York, Estados Unidos [8], asimismo, Berger realizó mediciones en una torre de aproximadamente 60 m en el monte San Salvatore, Suiza, entre los años 1950 y 1970. En este trabajo se logró caracterizar por primera vez, de forma intensiva los parámetros del rayo [9]. Posteriormente, en 1978 se realizaron otras mediciones en torres instrumentadas ubicadas en zonas templadas, Canadá “CN Tower” de 553 m [5] y Alemania “Peissenberg Tower” de 160 m, proporcionando datos complementarios a los adquiridos hasta ese momento [6].

La mayoría de los estudios publicados sobre datos de parámetros de descargas atmosféricas tuvieron lugar en regiones templadas, sin embargo, en 1985 se construyó la primera estación de investigación de rayos en Latinoamérica ubicada en zona tropical, que dispone de un sistema de medición instalado en la base de una torre

de 60 m de altura ubicada en la colina Morro do Cachimbo a 1430 m de altura sobre el nivel del mar, a las afueras de Belo Horizonte, Brasil [12]. Esta estación se dedica a registrar la intensidad de la corriente, la forma de onda, la tasa máxima de ascenso de la corriente, la multiplicidad, la polaridad, entre otros parámetros relacionados. Durante los años de medición se han obtenido 39 registros de corrientes de rayos [13][14]. En Colombia, para el año 1998, el investigador Horacio Torres inició un proyecto con la estación experimental Ilyapa ubicada en Samaná, Caldas, usando una torre instrumentada de 30 m de altura, la cual, en el 2001 fue trasladada a la población de puerto Olaya aumentando su altura a 60 m, donde obtuvo como resultado una única medición directa de corriente de rayo [15].

Colombia como país ubicado en zona tropical y con una topografía abrupta, tiene lugares con gran actividad de rayos, destacándose regiones como las del Catatumbo o el Magdalena Medio [5][16]. Esto pone en riesgo la integridad de las personas y demás seres vivos; actualmente en el país las mediciones de los parámetros propios del rayo en zonas tropicales son escasos, lo cual impulsó a desarrollar este trabajo. En este trabajo se presenta la primera etapa de un proceso de medición de corriente de rayo, en la Sede de la Universidad Industrial de Santander, ubicada en la ciudad de Barrancabermeja, mediante la instalación de un equipo en la terraza del edificio de esta institución, cuyo propósito fue medir corrientes de rayos nube-tierra que pudieran impactar en la edificación. En este trabajo se analizan los datos medidos en un periodo de cuatro meses, las cuales se compararán con las registradas por un Sistema de Localización de Rayos, y con el sistema LMA (Lightning Mapping Array) ubicado en la ciudad de Barrancabermeja.

Este documento está dividido así: en la sección 2 se presenta la metodología para la medición de corrientes de rayos, en la sección 3 se enseñan los resultados de las mediciones y en la sección 4 se exhiben las conclusiones.

2. Metodología

Para iniciar esta investigación fue necesario conocer los puntos con mayor actividad de rayos. Esto se realizó

mediante los datos suministrados por la red localizadora de rayos con tecnología LINET. Los sitios encontrados con más alta actividad se presentan sobre todo hacia el municipio de Yondó (Antioquia) contiguo a Barrancabermeja. Dado que no se contaba con un sitio acondicionado para instalar el equipo en esta zona, se opta por la sede UIS Barrancabermeja, que tenía una actividad media de rayos y que, si contaba con la accesibilidad necesaria para situar el equipo de medición de corriente de rayo, diseñado y construido previamente [17][18]. Establecido este lugar, se estudiaron el funcionamiento de los elementos que componen el equipo de medición, con el fin de realizar su adecuado ajuste y adaptación, garantizando que funcionara de manera apropiada; de igual forma, se identificaron las actividades que debían realizarse antes y durante la instalación en la Sede regional UIS Barrancabermeja, lugar que finalmente fue seleccionado para este propósito.

Concluida la instalación, se dio inicio al periodo de medición que comprendió un tiempo de cuatro meses entre noviembre de 2018 y febrero de 2019, en el cual se obtuvieron una serie de mediciones que fueron extraídas directamente del equipo en visitas de campo y mediante acceso remoto para posteriormente ser comparadas con el sistema localizador total de rayos propiedad de Keraunos S.A.S [19] buscando relación de tiempo y

espacio entre ellas. Finalmente, las señales que tuvieron cierta correspondencia se analizaron basadas en información suministrada por la red DABEIBA LMA [21], concluyendo así sobre el origen de las señales adquiridas mediante el equipo de medición.

2.1. Componentes del equipo

Se estableció la terraza del edificio de la Sede regional UIS ubicada en esta ciudad como lugar de instalación del equipo de medición, debido a que su ubicación al encontrarse en el casco urbano brindaba mayor seguridad y fácil acceso, lo cual, no implicaba costos adicionales en el desplazamiento en el momento de realizar seguimiento, verificación y/o mantenimiento al equipo de medición; adicionalmente, se contaba con servicios de energía eléctrica e internet, indispensables para su funcionamiento. En la Figura 1 se muestra el equipo finalmente instalado.

Este consiste de una bobina de Rogowski que, ubicada concéntrica con el pararrayos de la edificación, sensará el campo magnético producido por la corriente inyectada en la edificación y producirá una tensión inducida proporcional a la tasa de ascenso de la corriente (di/dt). Integrando esta tensión, digitalizándola y almacenándola, se obtiene la señal de corriente del rayo.



Figura 1. Vista final de instalación del equipo en la terraza de la sede UIS, Barrancabermeja.
Fuente: elaboración propia.

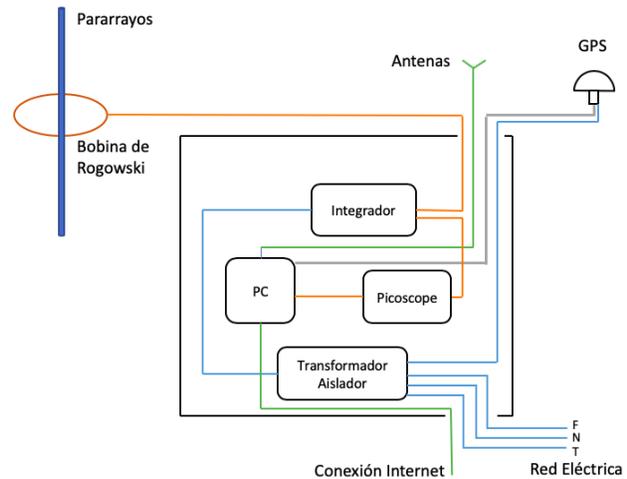


Figura 2. Distribución final de elementos dentro del equipo de medida. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 2 se presenta la vista final de la distribución de los elementos del equipo al interior de la caja y un esquema de cómo se encuentran interconectados. El sensor de corriente utilizado fue una bobina de Rogowski con un integrador de la empresa *PEM* con la capacidad de medir corrientes de hasta 120 kA con un di/dt máximo de $120 \text{ kA}/\mu\text{s}$. La señal medida se digitaliza a través de un osciloscopio Picotech 3205D con un ancho banda de 100 MHz, una resolución de 8 bits y una tasa de muestreo de 1 GS/s. La señal digitalizada se transfiere a un computador FitPC4 de dimensiones reducidas y bajo consumo (24 W), donde se almacena y se sincroniza en tiempo mediante un GPS GARMIN 19x ubicado en el exterior del equipo. Para realizar la comparación entre los registros de tiempo del equipo y la red LINET, el computador leía los datos provenientes del GPS y realizaba la sincronización del computador con una precisión de 1 s. No se contó con circuitos adicionales para realizar la sincronización. Adicionalmente, el computador mediante WiFi o la red LAN permite el acceso remoto a las señales medidas. Los dispositivos se alimentan de la red eléctrica a través de un transformador de aislamiento de 350 VA, el cual evita que se propaguen interferencias externas hacia el equipo. Los dispositivos fueron ubicados dentro de un cofre de intemperie hermético, fabricado en aluminio, que permite apantallar los equipos contra el campo electromagnético producido por el rayo.

3. Resultados

3.1. Comparación con la red LINET

Las señales adquiridas mediante el equipo de medición de corriente de rayos fueron comparadas con la Red Colombiana de Detección Total de Rayos con tecnología

LINET, la cual permitió tener una referencia confiable que facilitó el proceso de análisis de la información. Esta red permite adquirir datos de tiempo, longitud, latitud, altura, polaridad, corriente y tipo de rayos localizados dentro del área de Santander.

En el año 2011 entró en operación el Sistema colombiano de Detección Total de Rayos – LINET, esta permite detectar rayos nube-tierra e intra-nube. LINET es una tecnología de detección de actividad total de rayos (rayos intranube y nube-tierra). La detección total ha permitido evolucionar hacia herramientas de identificación de tiempo severo, detección temprana y predicción de tormentas eléctricas y rayos. La técnica de detección se basa en medidas de las radiaciones VLF y LF producidas por rayos, con las cuales se hace un análisis de soluciones en 3D a partir del método de detección TOA (Time Of Arrival) [19]. Para su evaluación se adelantaron campañas de medida en diferentes lugares del mundo (en toda Europa, Brasil, Australia, África y EE. UU.) donde su funcionamiento fue comparado con redes comúnmente usadas de LF y con sistemas avanzados y altamente costosos de VHF como SAFIR. En la actualidad, la red cuenta con más de 20 sensores ubicados a lo largo del país, dando cobertura a la mayor parte del país. El error de localización promedio de la red en la zona de estudio fue de 200 m.

Durante el periodo de adquisición, el equipo registró 68 mediciones debidas a posibles rayos ocurridos durante este tiempo, de las cuales, se conocen características como la forma de onda, valor pico de corriente, polaridad, fecha y hora UTC en que han tenido lugar o han sido detectadas. Conocida la fecha y hora específica de cada medición, comprendida entre las 0 y 24 horas y teniendo presente que la hora UTC corresponde a 5 horas

más que la hora local, se procede a comparar con la información proporcionada por LINET. Para tal fin, se recurre al registro histórico que es la opción que más información brinda, de manera que, al realizar inspección se encuentren registros de eventos de descargas atmosféricas relacionadas en espacio y tiempo.

Al comparar el total de las mediciones con la red LINET, se ve que en los días 22, 23, 27 de noviembre de 2018 y 20 de febrero de 2019 se presentan múltiples descargas en la ciudad de Barrancabermeja, comprobando la existencia de impactos cercanos a la sede UIS. Estos se presentan en el mismo rango de tiempo en que el equipo de medición de corriente de rayo obtuvo señales en los días anteriormente mencionados. En la Figura 3 se visualiza en Google Earth la información exportada desde LINET para este día, donde los puntos naranjas indican los impactos registrados en un rango de tiempo específico para cada día. En dicha figura, el círculo azul demarca una distancia máxima de 4 km respecto al lugar de instalación del equipo, ya que, esta es la longitud media alcanzada por las perturbaciones ocasionadas por rayos [20].

Inicialmente, para considerar las mediciones del equipo como impactos directos, estas se debían encontrar dentro de un radio aproximado de 200 metros, demarcado por el círculo verde, asumiendo como centro la ubicación del equipo, teniendo en cuenta que esta distancia corresponde al error de localización medio proporcionado por la red LINET.

Si bien, el criterio más aproximado para discriminar un impacto como directo o indirecto se basa en un método de incidencia tal como el método electrogeométrico. De acuerdo con este método, aquellos impactos que estén en

un radio de 50 m de la estructura son directos. Esto es válido cuando se sabe con exactitud la localización del rayo, sin embargo, dado el error de la red de localización de rayos, que en promedio es de 200 m en la zona de estudio, algunos rayos que se encuentran a las afueras del radio de 50 m son candidatos a ser impactos directos. Es así, cómo se incluyen aquellos que se encuentran dentro de un radio de 200 m.

A partir de este criterio se trazó una circunferencia de dicho radio en Google Earth (Figura 4) observando que en los días 27 de noviembre (Figura 4b) y 22 de noviembre (Figura 4d) de 2018, no se encuentran impactos dentro del círculo, pues el impacto más cercano ocurrió a 460 m y 1500 m respectivamente, sin embargo, para los dos días restantes (Figura 4a y 4c) si se encuentran impactos dentro del radio demarcado.

En la Tabla 1 se muestra la información de los cuatro impactos obtenidos por la red de localización de rayos que se sitúan en las proximidades de la sede UIS Barrancabermeja, tres de ellos presentados el día 23 de noviembre de 2018 y uno el 20 de febrero de 2019, de igual manera, en Tabla 2, se presenta la información extraída de las mediciones adquiridas mediante el equipo de medición de corriente de rayo durante el lapso mencionado anteriormente.

Al comparar los datos de la Tabla 1 y Tabla 2 se observa la existencia de eventos cercanos en tiempo que puede estar asociadas a descargas atmosféricas, sin embargo, la hora en que se registraron dichas mediciones por parte del equipo de medición no es exactamente igual, esto puede ser atribuido a errores debidos a la sincronización de tiempo del equipo, las mediciones que presentan relación en tiempo se presentan en la Tabla 3.

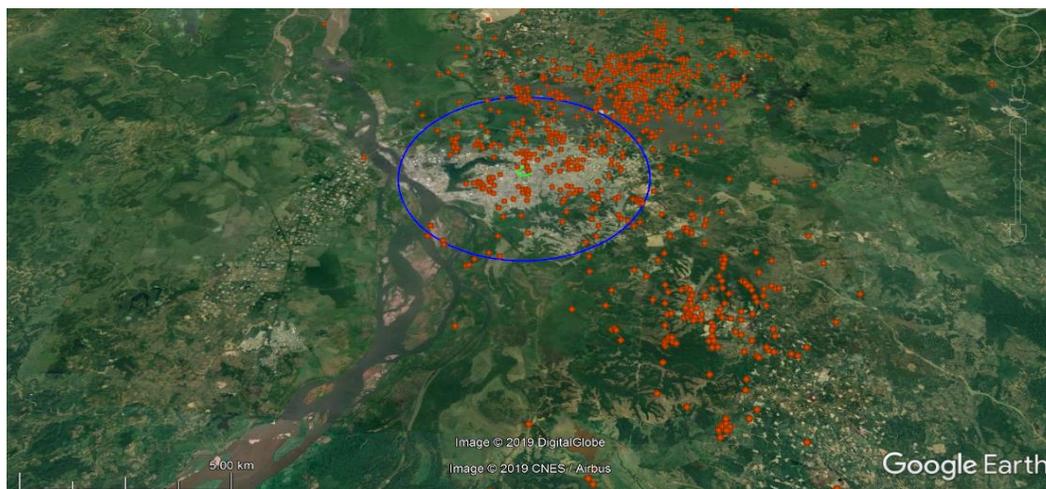


Figura 3. Eventos registrados dentro del radio de 4 km el día 23/11/2018 entre 7:00 y 7:30 UTC. Fuente: Google Earth.

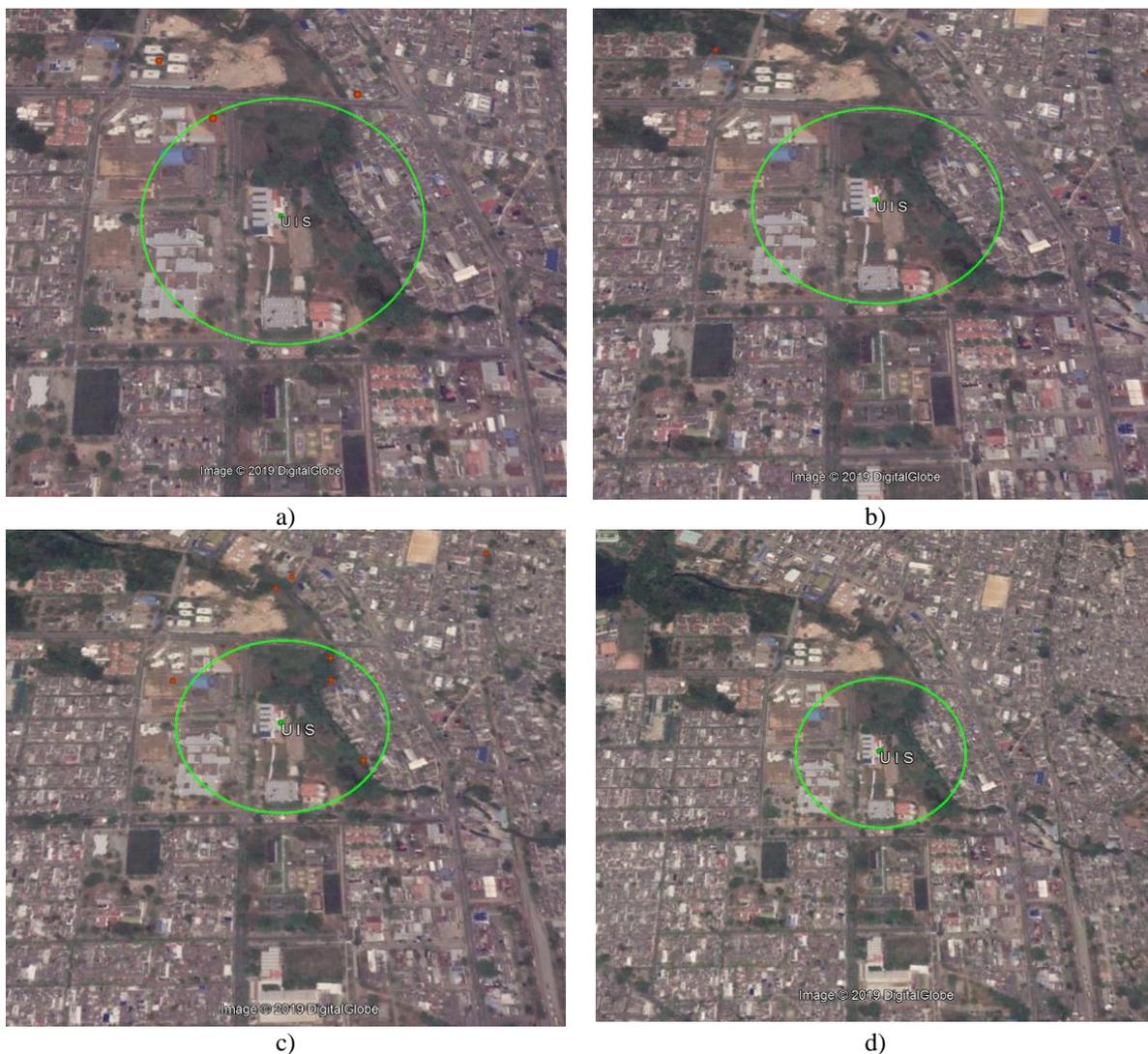


Figura 4. Eventos registrados en radio de 200 m. a) 20/02/2019, b) 27/11/2018, c) 23/11/2018, d) 22/11/2018.
Fuente: elaboración propia.

Tabla 1. Información de impactos dentro del radio de 200 m, suministrada por LINET 20/02/2019 y 23/11/2018

Fecha	Hora UTC	Polaridad	Corriente [kA]	Tipo	Coordenadas	
					Longitud	Latitud
20/02/2019	10:14:44,772	-	14,6	Nube-tierra	-73,8523	7,0718
23/11/2018	7:23:50,791	+	10,5	Intra-nube	-73,8505	7,0717
23/11/2018	7:13:31,508	+	9	Nube-tierra	-73,8500	7,0695
23/11/2018	7:08:44,237	-	8,8	Nube-tierra	-73,8505	7,0712

Fuente: elaboración propia.

Al comparar los datos de la Tabla 1 y Tabla 2 se observa la existencia de eventos cercanos en tiempo que puede estar asociadas a descargas atmosféricas, sin embargo, la hora en que se registraron dichas mediciones por parte del equipo de medición no es exactamente igual, esto

puede ser atribuido a errores debidos a la sincronización de tiempo del equipo, las mediciones que presentan relación en tiempo se presentan en la Tabla 3.

Se observa una discrepancia en la magnitud de los picos presentados en cada señal registrada por el equipo respecto a las indicadas por la red LINET, todas con polaridades opuestas, de las cuales, tres de ellas se muestran como nube tierra y uno intra-nube.

Tabla 2. Datos obtenidos mediante el equipo de medición el 20/11/2019 y 23/11/2018

Fecha	Hora UTC	Transitorio	Polaridad	Corriente [Ka]
20/02/2019	10:09:31	1	+	14,2
		2	+	1,9
		3	+	3,3
20/02/2019	9:26:16	1	+	12,8
		2	+	1,4
		3	+	7,7
		4	+	19,1
23/11/2018	7:30:50	1	-	11,7
23/11/2018	7:25:24	1	-	22,2
23/11/2018	7:19:23	1	-	11,8
23/11/2018	7:17:10	1	-	21,8
23/11/2018	7:15:08	1	-	31,8
		2	-	42,5
		3	-	25,8
		4	-	41,2
23/11/2018	7:13:25	1	-	13,7
23/11/2018	7:11:45	1	+	13,7
23/11/2018	7:07:45	1	+	34,2
		2	+	15,9
		3	+	14,9
		4	+	51,4
		5	+	26,3
		6	+	33,3
23/11/2018	7:05:12	1	+	12,0
		2	-	14,0
23/11/2018	7:03:20	1	-	41,0
		2	-	39,3
		3	-	21,4
		4	+	15,7
		5	-	18,0
23/11/2018	7:01:22	1	-	17,8
		2	-	32,3
		3	-	24,6
		4	-	14,0

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Tabla comparativa de las señales registradas por la red LINET y equipo de medición de corriente de rayo

Fecha	Hora UTC	LINET				Equipo de medida			
		P	Corriente [Ka]	Tipo	Error [m]	Hora UTC	Picos	P	Corriente [Ka]
20/02/2019	10:14:44,772	-	14,6	Nube-tierra	194,8	10:09:31	1	+	14,2
							2	+	1,9
							3	+	3,3
23/11/2018	7:23:50,791	+	10,5	Intra-nube	199,0	7:25:24	1	-	22,2
23/11/2018	7:08:44,237	-	8,8	Nube-tierra	156,5	7:07:45	1	+	34,2
							2	+	15,9
							3	+	14,9
							4	+	51,4
							5	+	26,3
							6	+	33,3
23/11/2018	7:13:31,508	+	9	Nube-tierra	186,7	7:13:25	1	-	13,7

Fuente: elaboración propia.

3.2. Comparación con la red LMA

Dado que es difícil discriminar si las mediciones anteriores (Tabla 3), corresponden o no a impactos directos, se analizaron los registros obtenidos de la red DABEIBA-LMA instalada en la ciudad de Barrancabermeja en el año 2018 en asocio entre la Universidad Politécnica de Cataluña, la Universidad Industrial de Santander y la empresa Keraunos. El radio de cobertura de la red LMA es de 45 km, esto comprende los municipios de Barrancabermeja y Yondó en el Magdalena Medio. La red cuenta con 6 sensores, uno de ellos instalado en la sede UIS Barrancabermeja y los demás en campos petroleros. Cada estación de medición está compuesta por un sistema de antenas de recepción de radio frecuencia, unidad de digitalización y almacenamiento de información y un sistema de sincronización de tiempo GPS de alta resolución. Este sistema utiliza una técnica de tiempo de llegada para detectar fuentes de emisiones electromagnéticas en el rango de muy alta frecuencia (60 – 66 MHz) debido a procesos de disrupción eléctrica (en inglés breakdown-process) durante propagaciones de líderes del rayo. Como resultado de la localización de dichas fuentes, la reconstrucción tridimensional y temporal de estructuras de rayos durante el ciclo de vida de una tormenta eléctrica es posible permitiendo identificar la posible trayectoria y puntos de impacto del rayo [21]-[23].

El LMA principalmente detecta líderes negativos (líder con carga negativa) que se propagan a través de regiones de carga positiva [24][25]. Por otro lado, líderes positivos (líder con carga positiva) que se propagan a través de regiones con carga negativa son débilmente detectados

por el sistema LMA, pero son a menudo detectados debido a procesos de recoil [26]. De esta forma, la densidad de fuentes VHF localizadas por el LMA revelan en detalle las regiones eléctricamente activas durante el ciclo de vida de una tormenta eléctrica como también permite la identificación de sus estructuras eléctricas y su evolución temporal. Se aclara que en las condiciones actuales de funcionamiento el sistema no detecta con precisión fuentes que se encuentren por debajo de 1 km.

Se analizó información del LMA correspondiente al 20 de febrero de 2019 entre las 5:10 - 5:20, hora local, o entre 10:10 - 10:20, UTC, y 23 de noviembre de 2018 entre las 2:00 - 2:30, hora local, o entre 7:00 - 7:30, UTC. Los datos registrados pueden ser visualizados en intervalos de tiempo de 10 minutos, por lo cual, se tuvieron en cuenta cuatro intervalos, los datos correspondientes a estos periodos se muestran en la Figura 5, 6, 7 y 8 respectivamente. Cada panel muestra la evolución temporal (color de los puntos) y espacial. El panel superior muestra la altitud de las fuentes de rayos en función del tiempo (segundos), el panel inferior izquierdo muestra la evolución de la tormenta espacialmente (latitud versus longitud), los paneles inferiores derechos muestran la altura vs latitud y altura vs longitud respectivamente. Se puede ver que para el 20 de febrero gran parte de la tormenta se desarrolla a alturas superiores a los 3 km, descartándose la presencia de rayos nube-tierra. En el caso del 23 de noviembre se evidencian líderes en general con alturas por encima de los 2 km, excepto en el caso de las 7:10 a 7:20 (Figura 7) en el que algunas fuentes se registran a alturas de 1 km, existiendo alta probabilidad de impactos nube a tierra.

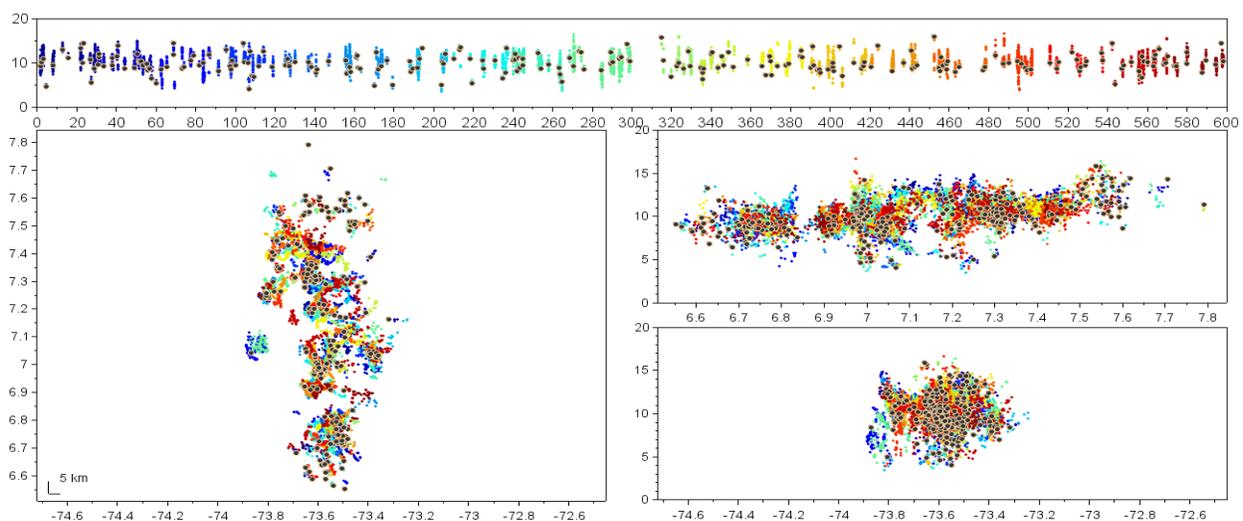


Figura 5. Intervalo de 10:10 – 10:20 UTC, 20 de febrero de 2019. Fuente: elaboración propia.

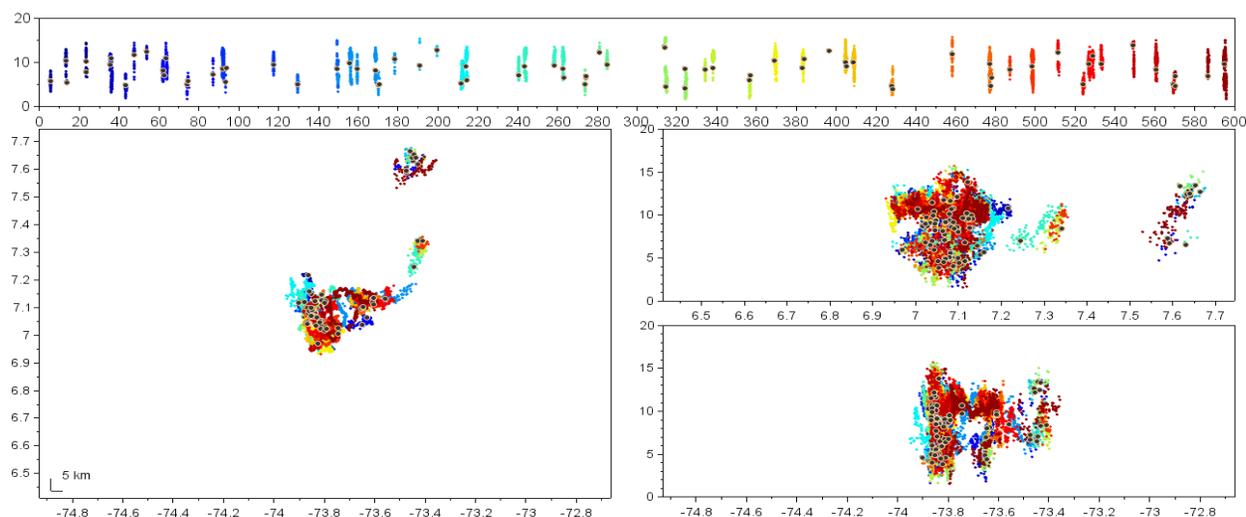


Figura 6. Intervalo de 7:00 – 7:10 UTC, 23 de noviembre de 2018. Fuente: elaboración propia.

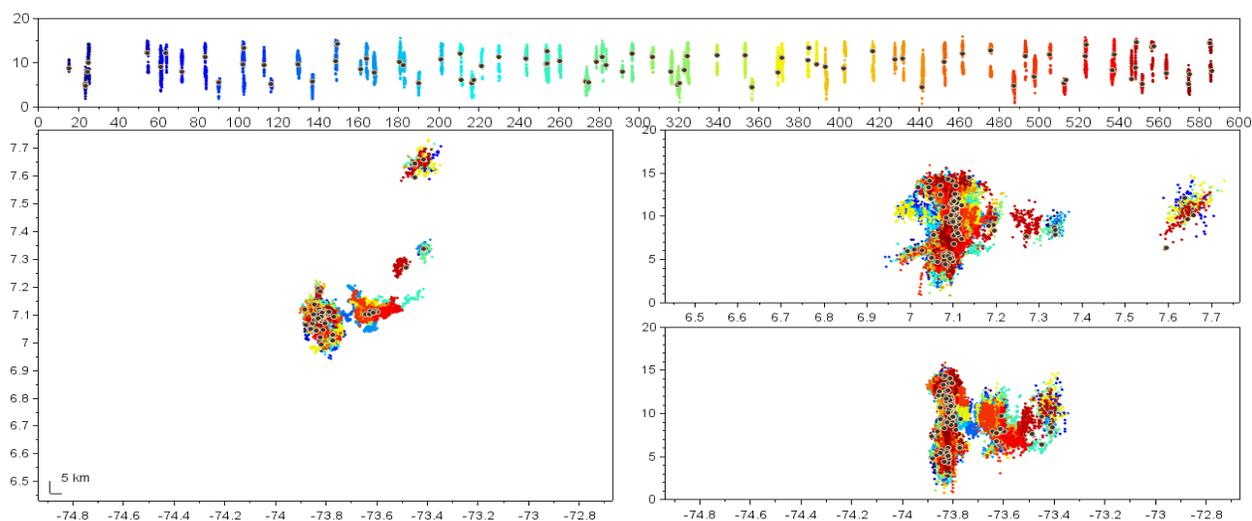


Figura 7. Intervalo 7:10 – 7:20 UTC, 23 de noviembre de 2018. Fuente: elaboración propia.

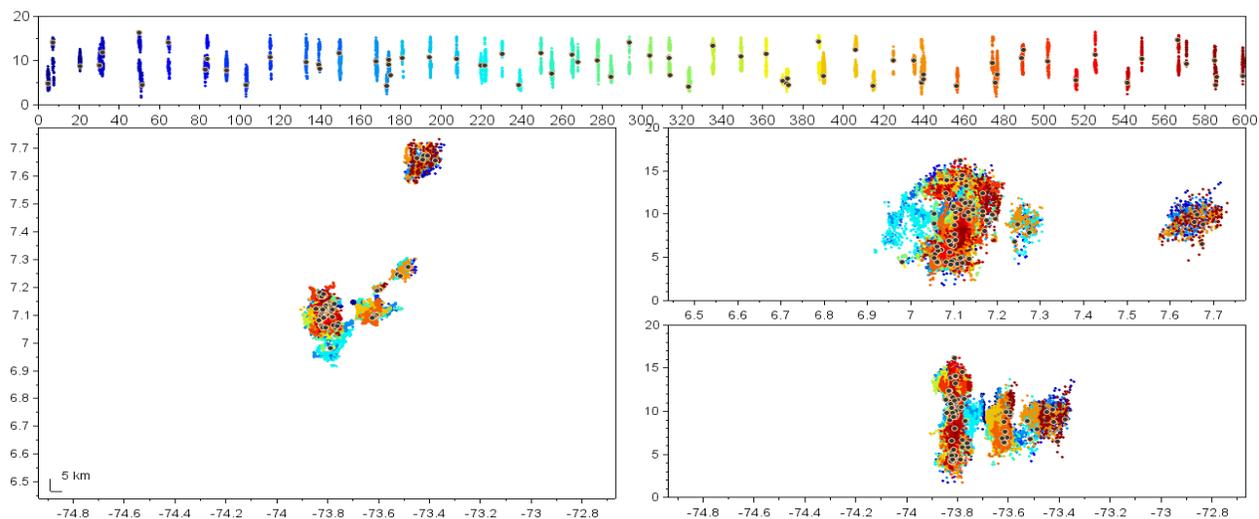


Figura 8. Intervalo 7:20 – 7:30 UTC, 23 de noviembre de 2018. Fuente: elaboración propia.



Figura 9. Visualización de fuentes detectadas por LMA e impactos detectados por LINET cerca a la sede UIS Barrancabermeja. Fuente: elaboración propia.

Las figuras mostradas anteriormente permiten visualizar características de la trayectoria de la tormenta, tales como, latitud, longitud, y altura a nivel del mar respecto al tiempo. Sin embargo, el interés de análisis de este trabajo se centró en determinar las alturas de los líderes escalonados que eran cercanos en tiempo y espacio a los eventos registrados por el equipo. Para conocer esta información, se exportaron los datos a Google Earth donde se identificaron aquellas fuentes de la descarga atmosférica presentes dentro del radio máximo de 200 metros. Una vez seleccionadas las fuentes, se determinó la altura y hora en que tuvieron lugar, de igual manera, se calculó la distancia hasta la ubicación del equipo de medición permitiendo conocer si los datos obtenidos corresponden a medición de impactos directos o a inducciones de campo magnético. En la Figura 9 se

visualizan únicamente dieciocho fuentes presentadas el 23 de noviembre de 2018, diferenciadas por su color según el intervalo de tiempo en que se presentaron, de esta forma, los puntos amarillos corresponden al intervalo de 7:00 – 7:10, los puntos azules de 7:10 – 7:20 y finalmente los puntos rojos de 7:20 – 7:30, ya que, el 20 de febrero de 2019 no se encuentran fuentes dentro del radio establecido. Adicionalmente, se observan sobrepuestos los cuatro rayos vistos en la red LINET. Relacionando la hora de ocurrencia de los eventos registrados por el equipo de medición de corriente de rayo con la información del LMA y la red LINET, se encuentra una diferencia de tiempo en minutos bastante significativa, ya que se esperaría que esta diferencia fuera de milisegundos o en el peor de los casos, de segundos.

Tabla 4. Datos de fuentes cercanas a la UIS Barrancabermeja extraídas del LMA

Intervalo	Fuentes	Hora UTC	Latitud	Longitud	Altura [Km]	Distancia [Km]
7:00-7:10 UTC	1	7:05:24	7° 4'11.64"N	73°51'10.44"O	5,0	0,172
	2	7:08:31	7° 4'9.84"N	73°51'7.56"O	13,6	0,126
	3	7:04:18	7° 4'8.40"N	73°51'4.32"O	10,1	0,143
	4	7:04:18	7° 4'14.16"N	73°51'7.56"O	10,4	0,087
	5	7:07:38	7° 4'12.00"N	73°51'5.40"O	13,6	0,033
	6	7:06:09	7° 4'13.80"N	73°51'1.80"O	12,7	0,101
	7	7:05:24	7° 4'12.36"N	73°51'0.72"O	8,4	0,132
	8	7:06:09	7° 4'9.48"N	73°50'59.64"O	13,0	0,196
	9	7:01:03	7° 4'11.64"N	73°51'9.72"O	12,2	0,152
7:10-7:20 UTC	1	7:17:21	7° 4'18.84"N	73°51'6.12"O	4,3	0,182
	2	7:12:44	7° 4'18.12"N	73°51'1.44"O	12,9	0,190
	3	7:15:19	7° 4'14.88"N	73°50'60.00"O	4,4	0,163
	4	7:18:13	7° 4'12.72"N	73°51'7.20"O	13,1	0,068
	5	7:18:13	7° 4'10.56"N	73°51'5.04"O	12,2	0,074
	6	7:15:19	7° 4'11.28"N	73°51'7.20"O	4,2	0,087
	7	7:18:13	7° 4'8.04"N	73°51'8.64"O	12,3	0,189
7:20-7:30 UTC	1	7:26:55	7° 4'8.40"N	73°51'5.76"O	6,8	0,143
	2	7:25:14	7° 4'11.64"N	73°51'10.80"O	13,7	0,184

Fuente: elaboración propia.

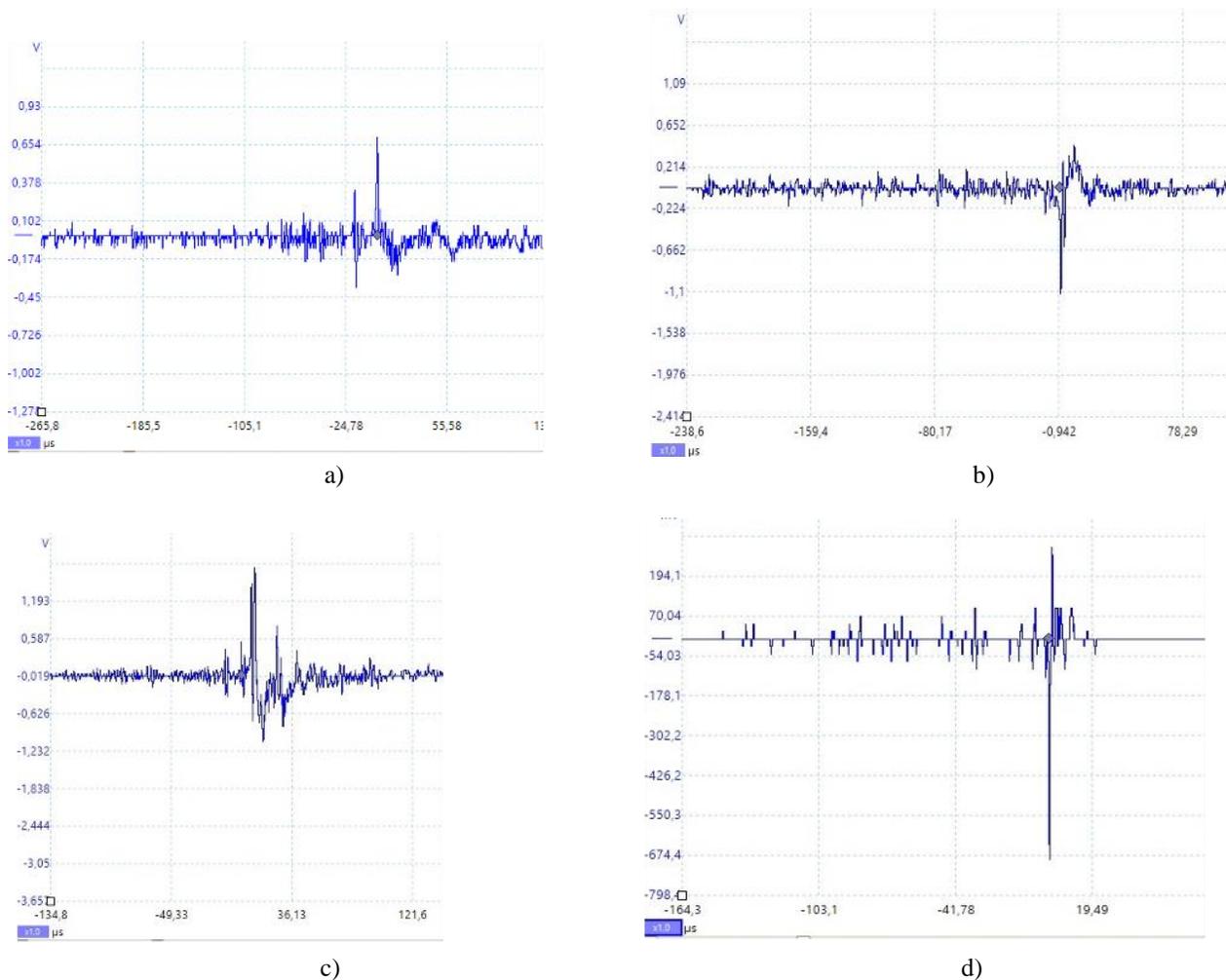


Figura 10. Señales obtenidas mediante osciloscopio a) 20/02/2019 a las 5:09:31 b) 23/11/2018 a las 2:25:24 c) 23/11/2018 a las 2:07:45 d) 23/11/2018 a las 2:13:25. 0,05 V en el eje de las ordenadas equivale a 1 kA , por ejemplo, 0,71 V corresponde a 14,2. Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 4 se observan las coordenadas, altura respecto al nivel del mar, la distancia entre la sede UIS Barrancabermeja y el punto de localización en el suelo (distancia horizontal) y hora local de las fuentes registradas por el LMA dentro del área. Se observa que existen fuentes que, a pesar de estar próximas en distancia horizontal al punto de incidencia, presentan alturas que superan los cuatro kilómetros de longitud, por lo cual, se concluye que las mediciones adquiridas por el equipo de medida de corriente de rayo no corresponden a señales de impactos directos, pues considerando que Barrancabermeja se encuentra a 75,94 msnm y sumando la altura de la terraza se estima que la altura para este tipo de impacto estaría a 90 metros, aproximadamente. Además, las formas de onda registradas por el equipo de

medición mostradas en la Figura 10 a, b, c, d, con tiempos de frente de 1,7 μ s, 2,7 μ s, 1,4 μ s y 0,6 μ s respectivamente, que están en el rango entre 0,5 μ s a 5 μ s, corresponden más a señales inducidas.

Se observa también que la tendencia de la forma de las señales difiere de la presentada en las formas de onda de corriente de retorno debidas a impactos directos nube-tierra encontradas en el estudio realizado en la estación Morro do Cachimbo en Brasil (Figura 11a) y en el ámbito nacional, en el estudio realizado por Horacio Torres en la estación experimental Ilyapa en Samaná - Caldas (Figura 11b)

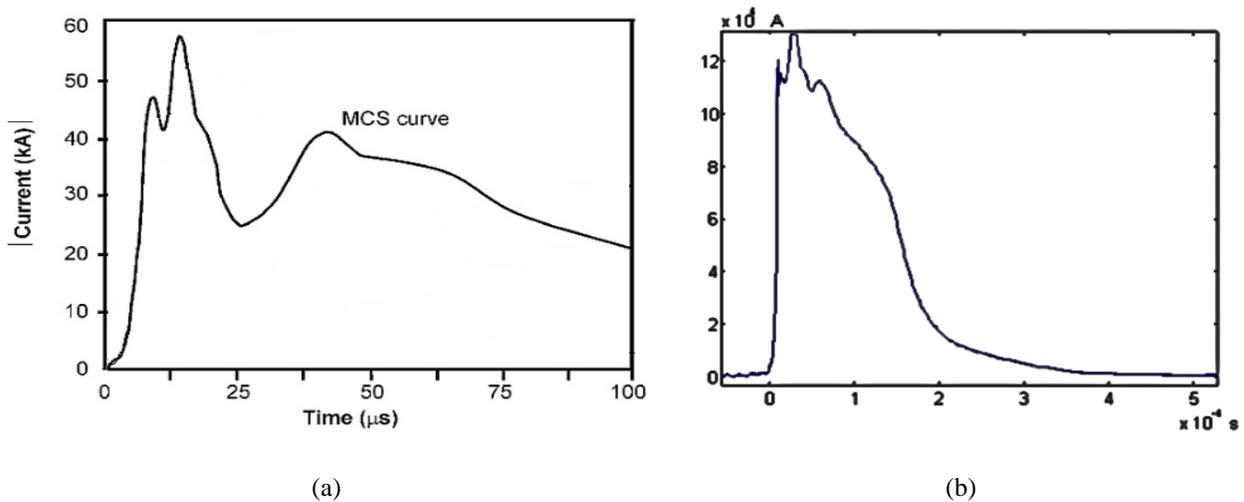


Figura 11. Formas de onda de corriente de rayo obtenidas en (a) Estación Morro do Cachimbo en Belo Horizonte - Brasil (b) Estación experimental Ilyapa en Samaná - Caldas. Fuente: (a) [27] (b) [4].

Entre las señales obtenidas también se encuentran mediciones como las visualizadas en la Figura 12, que pertenecen a días en los que tanto la red LINET y el sistema LMA no presentan registros, por esta razón, estas se pueden asociar a ruidos causados por micro interrupciones en la conexión, interferencias procedentes del propio sistema de medición, entorno ambiental o provenientes de dispositivos externos instalados en la misma terraza donde está ubicado el equipo de medición.

Del total de los registros obtenidos durante el periodo de medición, como se muestra en la Figura 13, se puede decir que alrededor del 20% de las señales corresponden a corrientes de rayo inducidas en un radio inferior a 200 m, un 12% a señales de corriente inducidas originadas

por eventos atmosféricos en una región definida entre un radio mayor a los 200 m y un radio menor a 4 km, mientras que el 68% restante se debe a ruidos o interferencias captadas por el equipo de medición. Dentro de las señales clasificadas como ruido se encuentran aquellas que tuvieron relación con transitorios resultados de la energización del equipo, desconexión del osciloscopio (descritas dentro de la hoja de datos del fabricante) e interferencia de aires acondicionados cercanos al equipo. Todas estas señales lograron ser excluidas del análisis al tener en cuenta que sus formas de onda no correspondían con inducciones de rayos.

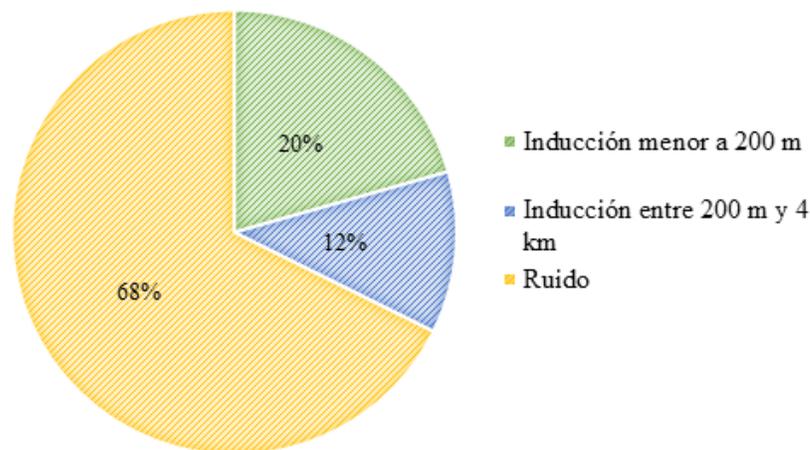


Figura 13. Procedencia de las señales adquiridas por el equipo. Fuente: elaboración propia.

4. Conclusiones

El estudio permitió realizar una caracterización preliminar de los registros de un equipo diseñado para medir corrientes de rayos. La instrumentación construida permitió obtener diversos registros que luego se entraron a analizar para verificar su relación o no con impactos directos, para esto se usaron dos redes localizadoras de rayos: la red LINET y LMA.

Se evidenció una diferencia significativa en la magnitud de la amplitud de la señal de corriente registrada por el equipo de medición y la indicada por la red de localización de rayos. Esto se debe a que el tipo de medición de ambos sistemas es distinto, pues la red LINET la realiza de forma indirecta, mientras que, el equipo de medición de corriente de rayo instalado la realiza de forma directa.

Conociendo el resultado del análisis realizado a la información suministrada por la red DABEIBA-LMA se puede inferir que las mediciones registradas el 23 de noviembre de 2018 no corresponden a corrientes debidas a un impacto directo, ya que las alturas encontradas de las fuentes próximas a la sede UIS Barrancabermeja superan los 4 km, por tanto, estas mediciones probablemente se deben a inducciones de corrientes originadas por rayos tipo intra- nube. A partir de la comparación de datos con la red de localización de rayos, se puede atribuir el origen de diferentes señales adquiridas por el equipo de medición de corriente de rayo a posibles interferencias provenientes de dispositivos eléctricos ubicados en el mismo lugar, ya que, existen días en que se tiene mediciones por parte del equipo instalado, las cuales, no son vistas en la red LINET.

No se logró obtener una corriente de rayo asociada a un impacto directo, puesto que el rayo es un fenómeno atmosférico que tiene un marcado carácter aleatorio, por lo que requiere de un amplio tiempo de medición. Se debe continuar con el proceso sistemático de medición de eventos asociados a rayos en la ciudad de Barrancabermeja y sus alrededores.

Agradecimientos

Se dan especiales agradecimientos a la empresa Keraunos SAS por suministrar la información de rayos de la ciudad de Barrancabermeja. Así mismo a la Universidad Politécnica de Cataluña por suministrar los datos de tormentas eléctricas de la red LMA en la misma ciudad.

Referencias

- [1] H. Torres, "Normas técnicas sobre protección contra rayos y sus aplicaciones", en *El rayo: Mitos, leyendas, ciencia y tecnología*, Colombia: Editorial Unibiblos, 2002, pp. 215-409.
- [2] M. Paolone, F. Rachidi-Haeri, C. Nucci "IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines", en *IEEE Std 1410-2004*, Nueva York, pp.1-50, doi: 10.1109/IEEESTD.2004.94577
- [3] "IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines", en *IEEE Std 1243-1997*, Nueva York, pp. 1-44.
- [4] H. Torres-Sanchez, "Aplicación de la protección contra rayos a la falla de transformadores de distribución", en *Normas técnicas contra rayos y sus aplicaciones*, Colombia: Editorial Unibiblos, 2002, pp. 143.
- [5] H. Torres, E. Perez, C. Younes, D. Aranguren, J. Montaña, J. Herrera, "Contribution to Lightning Parameters Study Based on Some American Tropical Regions Observations", *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 8, no. 8, pp. 4086-4093, 2015, doi: 10.1109/JSTARS.2015.2428217
- [6] M. Izadi, M. Z. A. Ab Kadir, V. Cooray, M. Hajikhani, "Estimation of Lightning Current and Return Stroke Velocity Profile Using Measured Electromagnetic Fields", *Electric Power Components and System*, vol. 42, no. 2, pp. 103-111, 2014, doi: 10.1080/15325008.2013.853214
- [7] F. Rachidi, J. L. Bermudez, M. Rubinstein, V. A. Rakov, "On the estimation of lightning peak currents from measured fields using lightning location system", *Journal of Electrostatics*, vol.60, no. 2-4, pp. 121-129, 2004, doi: 10.1016/j.elstat.2004.01.010
- [8] K. M. Eachron, "Lightning to the Empire State Building", *Journal of Franklin Inst*, vol. 227, no. 2, pp. 140-217, 1939, doi: 10.1016/S0016-0032(39)90397-2
- [9] K. Berger, R. B. Anderson, H. Kröninger, "Parameters of lightning flashes", *Electra*, no. 41, pp. 23-37, 1975
- [10] A. M. Hussein, W. Janischewskyj, J. S. Chang, V. Shostak, W. A. Chisholm, P. Dzurevych, Z. I Kawasaki,

- “Simultaneous measurement of lightning parameters for Strokes to the Toronto Canadian National Tower”, *Journal of Geophysical Research*, vol. 100, no. D5, pp. 8856-8861, 1995, doi: 10.1029/95JD00543
- [11] M. Manhardt, F. Heidler, K. Stimper, "The electric field of negative upward lightning strikes at the Peissenberg tower, Germany", en *2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP), Vienna*, 2012, pp. 1-9, doi: 10.1109/ICLP.2012.6344205
- [12] S. Visacro, A. Soares Jr., M. A. O. Schroeder, L. C. L. Cherchiglia, V. J. Sousa, “Statistical analysis of lightning current parameters: Measurements at Morro do Cachimbo station”, *J. Geophys. Res.*, vol. 109, no. D1, 2004, doi:10.1029/2003JD003662
- [13] S. Visacro, C. Mesquita, A. De Conti, F. H. Silveira, “Updated statistics of lightning currents measured at Morro do Cachimbo Station”, *Atmos. Res.*, vol. 117, pp. 55-63, 2012, doi:10.1016/j.atmosres.2011.07.010
- [14] M. Guimarães, P. Ramos, R. Sobreiro, S. Visacro, "Lightning Measurements at Morro do Cachimbo Station: new results," en *2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Shanghai, 2014, pp. 1695-1700, doi: 10.1109/ICLP.2014.6973401
- [15] H. Torres-Sanchez, “Transformador de distribución nuevo diseño para zona tropical”, programa de investigación, Universidad Nacional de Colombia, 2012, [En línea]. Disponible en <http://www.ing.una.py/pdf/trafo-zona-tropicalparaguay.pdf>
- [16] R. I. Albrecht, S. J. Goodman, D. E. Buechler, R. J. Blakeslee, H. J. Christian, “Where are the lightning hotspots on Earth?“, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 97, no. 11, 2051–2068, 2016. doi: 10.1175/BAMS-D-14-00193.1
- [17] A. M. Caballero, O. M. Moncada, “Selección de equipos para conformar un dispositivo de medición de corriente de rayos en una estructura elevada en el departamento de Santander”, trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander, 2018.
- [18] D. Y. Calderon, F. Y. Cely Quesada, “Artists, Construcción de un dispositivo para la medición de corrientes de rayo”, trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander, 2018.
- [19] Keraunos SAS. Red Colombiana de detección de rayos – LINET. 2015.
- [20] P. M. Arias, “Qué rayos sabemos sobre innovación tecnológica”, *Innovación y desarrollo tecnológico en la Ingeniería*, vol. 34, no. 3, pp.87, 2019.
- [21] W. Rison, R. J. Thomas, P. R. Krehbiel, T. Hamlin, J. Harlin, “GPS-based three-dimensional lightning mapping system: Initial observations in central New Mexico”, *Geophysical Research Letters*, vol. 26, no. 23, pp. 3573-3576, 1999, doi: 10.1029/1999GL010856
- [22] P. R. Krehbiel, R. J. Thomas, W. Rison, T. Hamlin, J. Harlin, y M. Davis, “GPS-based mapping system reveals lightning inside storms”, *Eos, Transactions American Geophysical Union*, vol. 81, no. 3, pp. 21-25, 2000, doi: 10.1029/00EO00014
- [23] R. J. Thomas, P. R. Krehbiel, W. Rison, S. J. Hunyady, W. Winn, T. Hamlin, J. Harlin, “Accuracy of the lightning mapping array”, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 109, no. D14, 2004, doi: 10.1029/2004JD004549
- [24] S. A. Weiss, W. D. Rust, D. R. MacGorman, E. C. Bruning, P. R. Krehbiel, “Evolving complex electrical structures of the STEPS 25 June 2000 multicell storm”, *Monthly Weather Review*, vol. 136, no. 2, pp. 741-756, 2008, doi: 10.1175/2007MWR2023.1
- [25] D. MacGorman, M. I. Biggerstaff, S. Waugh, J. T. Pilkey, M. A. Uman, D. M. Jordan, D. Betten, “Coordinated LMA, balloon-borne electric field, and polarimetric radar observations of a triggered lightning flash at Camp Blanding”, en *XV International Conference on Atmospheric Electricity*, Norman, Okla, 2014, pp. 15-20.
- [26] V. Mazur, “Physical processes during development of lightning flashes”, *Comptes Rendus Physique*, vol. 3, no. 10, pp. 1393-1409, 2002, doi: 10.1016/S1631-0705(02)01412-3
- [27] S. Visacro, “A representative curve for lightning current wavelshape of first negative stroke”, *Advancing earth and space science*, vol. 31, pp. 3, 2004, doi: 10.1029/2004GL019642