

Estación para el monitoreo de la actividad eléctrica de nubes de tormenta

Measurement station of lightning activity

Iván Carreño¹, Diego Ortiz², Carlos Gómez³ y Fernando Díaz-Ortiz⁴

Resumen

En este artículo se describen el diseño, la construcción y los resultados preliminares obtenidos en la implementación de una estación para el monitoreo de la actividad eléctrica de nubes de tormenta en la Universidad Central. Este fenómeno natural se puede estudiar midiendo las variaciones de campo eléctrico y campo magnético que las descargas generan en el ambiente. A partir de las señales registradas, es posible inferir características físicas del fenómeno que brinden información para formular teorías que expliquen la ocurrencia del evento. El fenómeno del rayo no es un proceso único o simple; por lo tanto, existen muchos aspectos sobre los cuales las mediciones realizadas pueden centrar su atención. Aquí el interés se concentra en estudiar un aspecto aún desconocido de la fenomenología del rayo: su origen en el interior de la nube de tormenta. De esta manera, las mediciones buscan estudiar un tipo de descarga particular denominado CID por su sigla en inglés (*compact intra-cloud discharge*). Esta descarga eléctrica emite una gran cantidad de energía electromagnética, pero es de naturaleza transitoria (pocos microsegundos), así que toda la instrumentación que a continuación se des-

cribe, si bien sirve para estudiar otras partes del proceso del rayo, se concentra, en este caso, en el tipo de descarga señalado.

Palabras clave: rayos, interferómetro, nube de tormenta, antena rápida, campo eléctrico.

Abstract

This article describes the design, construction and preliminary results obtained in the deployment of a measuring station for the electrical activity of thunderclouds at Universidad Central. The study of this natural phenomenon can be done mea-

¹ Estudiante de Ingeniería Electrónica, Universidad Central. Auxiliar de investigación en el proyecto "Observación de CID y TLE en la sabana de Bogotá". Correo: icarrenop1@ucentral.edu.co.

² Ingeniero electrónico y magíster en Administración de Empresas. Profesor del Departamento de Ingeniería Electrónica de la Universidad Central. Correo: dortizo1@ucentral.edu.co.

³ Ingeniero electricista y candidato a doctor en Ingeniería Eléctrica. Profesor del Departamento de Ingeniería Electrónica de la Universidad Central. Correo: cgomezv1@ucentral.edu.co.

⁴ Ingeniero electrónico, magíster en Ingeniería Electrónica y magíster en Ciencias de la Información y las Comunicaciones. Candidato a doctor en Ingeniería Eléctrica. Profesor del Departamento de Ingeniería Electrónica de la Universidad Central. Correo: fdiaz@ucentral.edu.co.

asuring the electric field and magnetic field variations in the environment associated with these discharges. From the acquired signals it is possible to infer some physical characteristics of the phenomena that provides information for formulating theories that explain the occurrence of the event. The lightning discharge is not a single process, nor a simple process; therefore, there are many aspects to focus. In this project, the interest focuses on studying an unknown issue of the phenomenology of lightning, the origin of electrical activ-

ity inside a thundercloud. In this way, the measurements aim to investigate a specific discharge called CID (Compact Intracloud Discharge). This discharge emits a vast amount of electromagnetic energy, but it is of transient nature (few microseconds), therefore the instrumentation described below, although it is useful to study other parts of the lightning process, in this case, it concentrates on the measurement of CIDs.

Keywords: lightning, interferometer, thundercloud, fast antenna, electric field.

1. Introducción

Las descargas eléctricas atmosféricas (rayos) son un fenómeno natural muy familiar para todos nosotros, pero paradójicamente poco entendido. Los primeros intentos por dar una explicación científica al fenómeno datan de poco más de un siglo, con los experimentos propuestos por Benjamin Franklin. Antes de este tiempo, sin excepción, en todas las culturas, las explicaciones sobre la naturaleza del rayo se encontraban ligadas a manifestaciones de deidades y seres sobrenaturales (Cooray, 2015).

Con respecto a su fenomenología, las descargas eléctricas atmosféricas son de varios tipos y pueden ocurrir al interior de la nube, entre la nube y la tierra, entre nubes adyacentes o entre la nube y regiones superiores de la atmósfera (Dwyer y Uman, 2013). Los rayos se presentan en todas las latitudes, pero tienen una mayor presencia en el trópico. Aunque aún hay divergencia entre las estimaciones, se cree que en el planeta ocurren entre 50 y 100 descargas por segundo. De acuerdo con los estudios realizados hasta el momento, Co-

lombia es una de las regiones con mayor actividad eléctrica atmosférica en el mundo, lo cual se evidencia en Cecil, Buechler y Blakeslee (2014 y 2015), Collier, Bürgesser y Ávila (2013) y Christian (2003). Los valores para Colombia oscilan entre 20 y 30 rayos/km²/año. Sin embargo, existen zonas del valle del Magdalena, Antioquia y la región del Catatumbo donde estos valores superan los 50 rayos/km²/año (López et ál., 2016; Albrecht, Goodman, Buechler, Blakeslee y Christian, 2016). Las afectaciones producidas por estas descargas se encuentran documentadas en varios estudios que muestran la severidad de las pérdidas y la sorprendente frecuencia con que ocurren, en especial en zonas rurales. Lo más inquietante de este panorama es que recientes trabajos sugieren que el calentamiento global puede influir en un incremento de la intensidad de la actividad eléctrica atmosférica global (Del Genio, 2011; Price, 2009; Díaz-Ortiz y Roman, 2015a).

Aun cuando existen varios estudios sobre los fenómenos relacionados con los rayos, persisten muchos interrogantes sobre la física del fenómeno y las repercusiones que estas

tienen tanto a nivel de la troposfera como en capas superiores de la atmósfera (Dwyer y Uman, 2013). Además, se debe tener en cuenta que la atmósfera terrestre es un sistema dinámico en donde los fenómenos electromagnéticos se ven afectados por variables tales como latitud, temperatura, orografía, régimen de vientos, entre otros. Así, por ejemplo, la región ecuatorial en donde se encuentra ubicada Colombia es una zona de confluencia de vientos conocida como zona de convergencia intertropical, que tiene particularidades únicas en el mundo. De esta manera, es posible decir que los rayos en Colombia tienen sus propias particularidades y, en consecuencia, los datos que se obtienen en el país difieren de los obtenidos en regiones subtropicales (Mushtak, Williams y Boccippio, 2005; Díaz-Ortiz y Roman, 2015b; Aranguren, López, Inampúes, Torres y Betz, 2017). En Colombia se han adelantado esfuerzos para caracterizar la actividad de rayos en el país, con el fin de entender la física del fenómeno, pero también para mejorar los sistemas de protección contra rayos que afectan especialmente a la infraestructura eléctrica nacional (Aranguren, López, Montanyà y Torres, 2018; López et ál., 2016).

Actualmente, la mayor parte del conocimiento acerca de los rayos se obtiene mediante la observación indirecta, esto es, el estudio de los campos electromagnéticos generados por la nube de tormenta. La localización de rayos basada en la detección de campos magnéticos usa un enfoque denominado *direction finding*, que consiste en un arreglo ortogonal de antenas tipo lazo, con distintas formas y tamaños, que detecta las variaciones del campo magnético ambiental para determinar la dirección de arribo (azimut) y la distancia al evento que produjo la emisión. Este enfoque es eficaz para la detección de descargas verticales, como es

el caso de los rayos entre la nube y la tierra. Debido a su utilidad, durante décadas se han desarrollado redes nacionales y globales dedicadas a la localización de rayos (*lightning location systems*) (Betz et ál., 2009). Las formas de onda capturadas por cada antena dan información para estimar parámetros del rayo como carga transferida, corriente pico, potencia de la descarga, entre otros.

Por su parte, para la medición de campos eléctricos asociados a los rayos se usan dipolos de placas paralelas, molinos de campo y variedad de antenas que trabajan de manera individual, o como parte de un arreglo (Secker y Chubb, 1984) (Aranguren, Inampúes, Torres, López y Pérez, 2012). Los arreglos distribuidos (distancia entre antenas de varios kilómetros) se denominan *lightning mapping array* (LMA) (Thomas et ál., 2004). Los arreglos con distancias entre antenas de pocos metros se denominan interferómetros (Ushio, Wu y Yoshida, 2015). Nuevamente, las formas de onda dan información detallada sobre la actividad de la nube de tormenta. La información redundante proveniente de los arreglos permite localizar dicha actividad en dos y tres dimensiones, ofreciendo una visión más completa del desarrollo y evolución de la actividad eléctrica de la nube de tormenta (Kolmašová et ál., 2018). Las técnicas de análisis usadas por los LMA están basadas en tiempos de arribo de la señal (*time of arrival* y *time difference of arrival*). En el caso de los interferómetros, las técnicas se basan en la determinación de la diferencia de fase o tiempo entre dos señales (Akita et ál., 2014; Stock, 2014). En todos los casos se usan diferentes métricas para seleccionar las formas de onda adecuadas para el análisis de datos. Adicionalmente, se usan análisis estadísticos para efectos de validación y comparación de resultados. Otras tecnologías que se emplean para el estudio de rayos son: satélites meteoro-

rológicos, radares meteorológicos, aviones instrumentados, sondas meteorológicas, torres instrumentadas, cámaras de alta velocidad, fotómetros, sensores de rayos X, sensores de rayos gamma y torres de lanzamiento para el inicio artificial de rayos.

El resto del artículo se estructura de la siguiente manera: en la segunda sección, se describen el diseño y la construcción de un sistema para la medición del campo eléctrico y de un sistema para la medición de la derivada del campo eléctrico; en la tercera, se describen el diseño y la construcción de un interferómetro de banda ancha proyectado para la localización de las fuentes de emisión de campo eléctrico al interior de la nube de tormenta, y, por último, se presentan algunas conclusiones del trabajo realizado.

2. Sistema de medición de campo eléctrico

Este sistema está compuesto por una antena de placas paralelas, un integrador, un *buffer* y dos segmentos de cable coaxial RG 58. Un segmento une la antena con el integrador y el otro une el circuito con la unidad de muestreo y adquisición de datos (píscopo 5443D). La constante de tiempo del integrador define la naturaleza de la antena, la cual se define como rápida o lenta. Aunque estos valores son subjetivos dependiendo de los re-

querimientos de la medición, por lo general, una constante de tiempo superior a 1 ms se considera como lenta. El *buffer* tiene como función acoplar la señal de la antena al segmento largo del cable coaxial. En la figura 1 se presenta un diagrama general que muestra la configuración de este sistema. El receptor GPS es una tarjeta PCI instalada en el computador que permite tener una marca de tiempo precisa para identificar los tiempos de ocurrencia de los eventos bajo estudio.

El nivel de tensión a la entrada del módulo de adquisición depende de una serie de factores que se agrupan bajo el nombre de factor de medida. Este factor tiene en cuenta todos los aspectos que afectan la medición, así como el desempeño y los valores reales de los elementos que conforman el sistema. El voltaje a la entrada del módulo de adquisición se define —como se muestra en la ecuación 1— como el valor de la componente vertical del campo eléctrico ambiental medido por la antena, multiplicado por el factor de medida.

$$V_m = E_n \times F_{med} \quad (\text{Ec. 1})$$

A su vez, el factor de medida se define como se detalla en la ecuación 2:

$$F_{med} = h_{eff} \times F_{ce} \times F_{cable} \quad (\text{Ec. 2})$$

h_{eff} se refiere a la altura efectiva de la antena y cuantifica el valor en el que se modifica la medición de campo eléctrico ambiental por efecto de la ubicación física de la antena en el

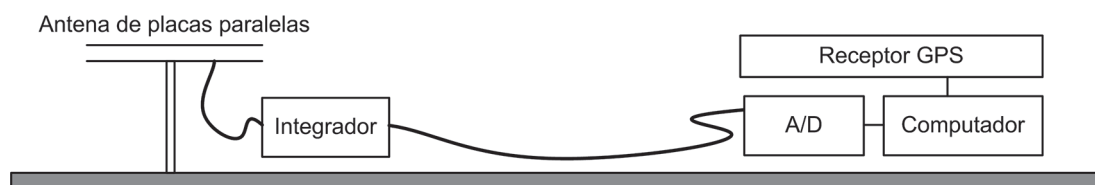


Figura 1. Diagrama de bloques del sistema de medición de la componente vertical del campo eléctrico ambiental asociado a actividad eléctrica de nubes de tormenta.

Fuente: Díaz-Ortiz (2018).

sitio de medición. Para determinar este factor se debe conocer el valor de la capacitancia de la antena y la altura física de su ubicación. Las mediciones de capacitancia se hicieron con medidor RLC Phillips PM6304, que determinó un valor medio de 160 pF. La altura efectiva se determinó de manera experimental, haciendo mediciones de la antena ubicada en medio de un arreglo de placas paralelas, a la cuales se les aplicó un impulso de voltaje de 1000 V con una forma de onda 1 μ s/100 μ s. Adicionalmente, se debe hacer una corrección para tener en cuenta la ubicación final de la antena (en este caso la terraza del pasaje Ley) junto con su entorno. De las mediciones y simulaciones realizadas se tiene que el valor de altura efectiva de la antena es de 0.2337.

El factor F_{ce} se refiere a las pérdidas de inserción de los circuitos integrador y *buffer*. Para ello, se evaluó la respuesta en frecuencia de los circuitos y se realizaron mediciones de los parámetros S. Los resultados obtenidos cuantifican este factor en un valor de 0.08.

El factor F_{cable} cuantifica la atenuación que el cable aplica sobre la señal medida. El cable RG58 se caracteriza por tener un valor bajo de atenuación; aun así, para las longitudes de cable empleadas en el sistema, el valor de atenuación es de 1.3 dB. Con las mediciones realizadas se determina que el factor de medida para este sistema es de 0.014.

A la entrada del módulo de adquisición, por efecto del integrador, se tiene una señal V_m que se puede expresar como lo indica la ecuación 3.

$$V_m = \frac{1}{C} \int I dt \quad (\text{Ec. 3})$$

Dicho de otra forma:

$$V_m = \left(\frac{\pi r^2 \epsilon_0 \epsilon_r}{C} \right) \int \frac{dE_n}{dt} dt \quad (\text{Ec. 4})$$

Lo que significa la ecuación 4 es que la presencia del integrador hace que el voltaje medido sea directamente proporcional a la componente vertical del campo eléctrico ambiental. Sin la presencia del integrador, el voltaje sería directamente proporcional a la derivada del campo eléctrico ambiental. Esta modificación es la que se aplica en el segundo sistema de medida, en el cual no se utiliza el circuito integrador con el objetivo de registrar la derivada de la componente vertical del campo eléctrico. Esta medición es relevante porque permite evidenciar cambios rápidos que, en el caso de las descargas eléctricas atmosféricas, se asocian a elongaciones rápidas del líder al interior de la nube de tormenta. La figura 2 muestra el detalle de este segundo sistema. Es claro en el diagrama que los cálculos y mediciones anteriormente descritas aplican para este sistema. Solo es necesario no incluir el valor del factor asociado a pérdidas de inserción de los circuitos integrador y *buffer*.

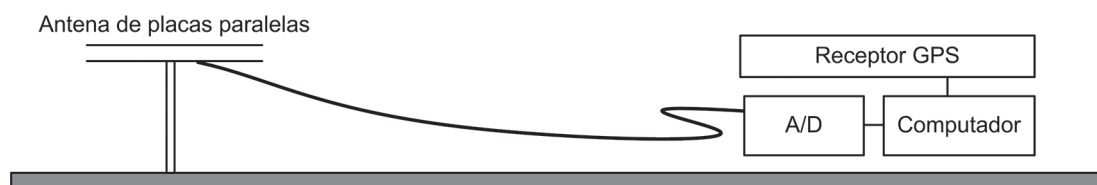


Figura 2. Diagrama de bloques del sistema de medición de la componente vertical de la derivada del campo eléctrico ambiental asociado a actividad eléctrica de nubes de tormenta.

Fuente: Díaz-Ortiz (2018).

3. Interferómetro de banda ancha

Un interferómetro de banda ancha para monitoreo de rayos es un sistema de medida de campo eléctrico que tiene como propósito localizar la fuente de emisión de pulsos de campo eléctrico al interior de una nube de tormenta. Al ser un sistema de alta velocidad, es posible localizarla en el orden de miles de fuentes por segundo, lo que permite crear mapas que muestran la forma como se desarrolla una descarga eléctrica al interior de la nube. Su composición, tal como lo muestra la figura 3, consiste en un arreglo de antenas, unos elementos de acondicionamiento de señal (filtros y amplificadores de bajo ruido) y un sistema de muestreo y adquisición para el procesamiento de los datos. Las antenas elegidas para esta implementación son antenas tipo disco con un ancho de banda de 25 MHz a 1300 MHz. La ubicación de las antenas se hace en los vértices de un triángulo rectángulo.

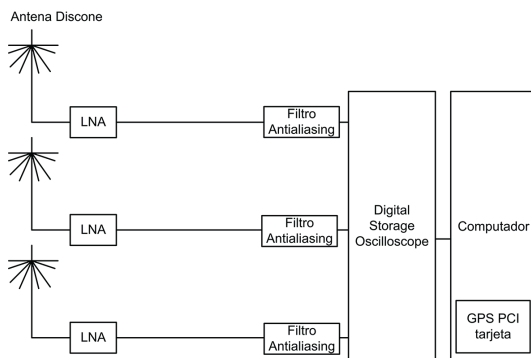


Figura 3. Diagrama de bloques del interferómetro de banda ancha para la localización de fuentes de campo eléctrico al interior de nubes de tormenta. Fuente: Díaz-Ortiz (2018).

El principio de funcionamiento del interferómetro es relativamente simple. La figura 4 muestra la geometría que se usa de referencia para la implementación. El sistema está en ca-

pacidad de localizar fuentes al interior de la nube de tormenta en dos dimensiones (azimut y elevación).

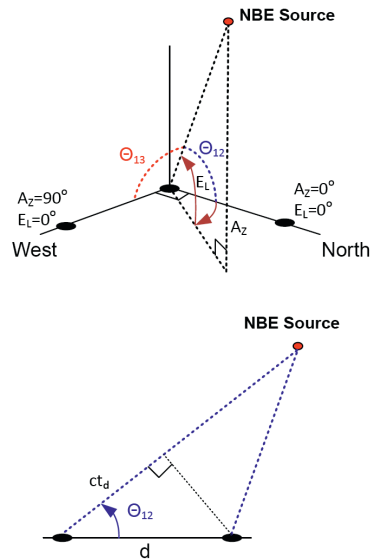


Figura 4. Geometría básica usada para las mediciones realizadas por el interferómetro. La distancia entre antenas se denomina línea base. La longitud de las líneas bases ortogonales es de 10 m. Fuente: Díaz-Ortiz (2018).

De la geometría se deduce que los ángulos de azimut y elevación se pueden calcular usando las ecuaciones 5 y 6.

$$Azimut = \tan^{-1} \left(\frac{\cos \theta_{13}}{\cos \theta_{12}} \right) \quad (\text{Ec. 5})$$

$$Elevación = \cos^{-1} \left(\frac{\cos \theta_{13}}{\sin (Azimut)} \right) \quad (\text{Ec. 6})$$

Para calcular los ángulos existen dos alternativas relacionadas, pero con diferencias significativas desde el punto de vista del procesamiento de los datos. Su estimación se puede hacer basada en el tiempo de diferencia entre el arribo de la señal a la antena 1 y a la antena 2. La segunda opción es estimar la diferencia de fase para cada una de las componentes de frecuencia de la señal que arriba a las antenas

1 y 2. La transformada de Fourier de esta diferencia es proporcional a un desplazamiento temporal. Aunque en principio los dos enfoques son efectivos para determinar la diferencia de tiempo, la presencia de ruido y otras fuentes de interferencia hacen del proceso algo supremamente complejo, que demanda la inclusión de procesos adicionales de filtrado y mejoramiento de la relación señal a ruido.

En el interferómetro que se encuentra en etapa de finalización, la opción seleccionada fue el cálculo de la fase, acompañada de filtrado pasabanda y reducción de ruido basado en análisis Wavelet (Díaz-Ortiz y Roman, 2018). Los resultados iniciales son prometedores y actualmente se está trabajando en la evaluación de la precisión del sistema.

4. Resultados preliminares

Las mediciones realizadas hasta el momento se encuentran en proceso de clasificación y validación, teniendo en cuenta que el sistema de medida requiere ajustes, dadas las condiciones del sitio de instalación de la estación de medición. A manera de muestra de algunas de las señales ya registradas, se tiene como ejemplo la figura 5, que corresponde a un conjunto de pulsos generados por descargas eléctricas que hacen parte del desarrollo de una descarga tipo líder que, a su vez, dará lugar a una descarga interna en la nube o de nube a tierra. Esta secuencia de pulsos se conoce como *preliminary breakdown pulses* (PBP).

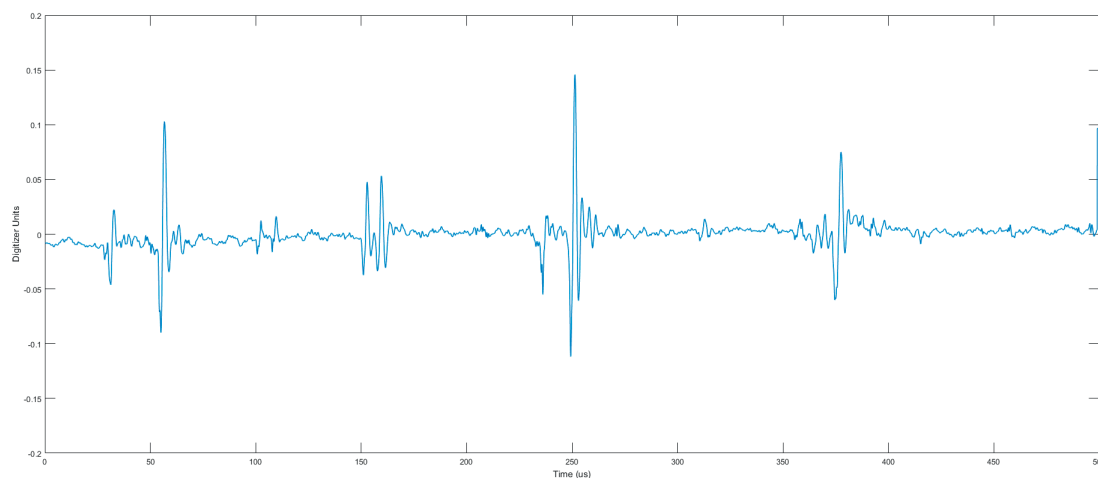


Figura 5. Secuencia de pulsos conocidos como *preliminary breakdown pulses*, que se presentan al inicio de una descarga eléctrica en la nube de tormenta. Señales registradas en la tormenta eléctrica del 14 de noviembre a las 14:19. Fuente: Díaz-Ortiz (2018).

En la figura 6 se presenta otro ejemplo de señales ya registradas. En este caso se muestran unos pulsos asociados a descargas de alta energía que generan alta radiación en bandas HF y VHF y que se utilizan para la creación de mapas que muestran el desarrollo del rayo al inte-

rior de la nube. Se considera que estos pulsos se generan cuando se tiene una extensión de la longitud del líder al interior de la nube. El registro de pulsos CID ha sido difícil, pero ya se tienen algunos posibles registros que aún se encuentran bajo verificación.

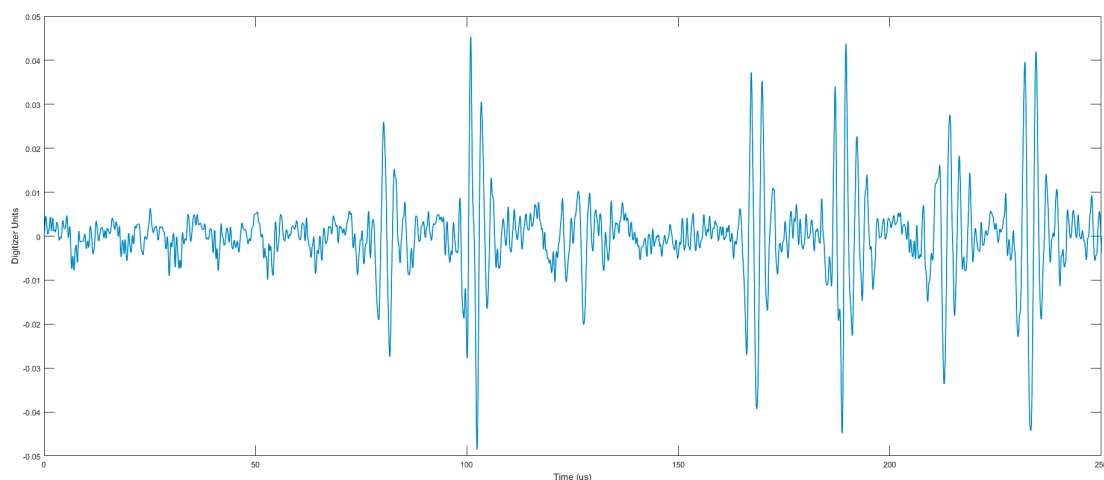


Figura 6. Secuencia de pulsos de HF generados por descargas que hacen parte del desarrollo de una descarga tipo líder al interior de la nube de tormenta. Fuente: Díaz-Ortiz (2018).

5. Conclusiones

La construcción de sistemas de medición plantea un reto frente a la calibración y, por tanto, frente a la confiabilidad de los datos producidos por el sistema. Es necesario prestar atención al diseño de estrategias para la validación de los sistemas de medida, especialmente en contextos en donde no existen herramientas o metodologías de fácil acceso. El proceso de validación se encuentra en desarrollo, con apoyo de la información aportada por la red de localización de rayos *World Wide Lightning Location Network* (WWLLN).

En ese sentido, es importante que se tengan en cuenta las condiciones físicas y de infraestructura en donde se realiza el montaje final del sistema, ya que algunas cosas que se podrían asumir como simples terminan siendo realmente complejas. En este caso, la presencia del sistema de alimentación ininterrumpida del edificio, junto con las luces led,

aporta gran cantidad de interferencia electromagnética por encima de la banda HF.

La construcción de estos sistemas de medición genera una cantidad de conocimiento (*know-how*) que enriquece la actividad de investigación; además, posiciona a la Universidad Central como la segunda universidad del país y la primera de carácter privado en contar con instrumentación especializada para el monitoreo de la actividad eléctrica de las nubes de tormenta en Colombia.

Agradecimientos

Este proyecto ha sido financiado mediante un crédito-beca otorgado por la Convocatoria Doctorados Nacionales 2015 del Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (Colciencias) y la VI Convocatoria Interna para Grupos de Investigación de la Universidad Central.

Referencias

- Akita, M., Stock, M., Kawasaki, Z., Krehbiel, P., Rison, W. y Stanley, M. (2014). Data processing procedure using distribution of slopes of phase differences for broadband VHF interferometer. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 119(10), 6085-6104. doi: <http://doi.org/10.1002/2013JD020378>.
- Albrecht, R., Goodman, S., Buechler, D., Blakeslee, R. y Christian, H. (2016). Where are the lightning hotspots on Earth? *Bulletin American Meteorological Society*, 97, 2051-2068. doi: <http://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00193.1>.
- Aranguren, D., Inampues, J., Torres, H., López, J. y Pérez, E. (2012). Operational analysis of electric field mills as lightning warning systems in Colombia. En *2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP)*.
- Aranguren, D., López, J., Inampué, J., Torres, H. y Betz, H. D. (2017). Cloud-to-ground lightning activity in Colombia and the influence of topography. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 154, 182-189. doi: <http://doi.org/10.1109/ICLP.2014.6973430>.
- Aranguren, D., López, J., Montanya, J. y Torres, H. (2018). Natural observatories for lightning research in Colombia. En *2018 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)* (pp. 279-283). Cartagena, Colombia.
- Betz, H. D., Schmidt, K., Laroche, P., Blanchet, P., Oettinger, W. P., Defer, E., ... Konarski, J. (2009). LINET—An international lightning detection network in Europe. *Atmospheric Research*, 91(2-4), 564-573. doi: <http://doi.org/10.1016/j.atmosres.2008.06.012>.
- Cecil, D. J., Buechler, D. E. y Blakeslee, R. J. (2014). Gridded lightning climatology from TRMM-LIS and OTD: dataset description. *Atmospheric Research*, 135-136, 404-414. doi: <http://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.06.028>.
- Cecil, D. J., Buechler, D. E. y Blakeslee, R. J. (2015). TRMM LIS climatology of thunderstorm occurrence and conditional lightning flash rates. *Journal of Climate*, 28(16), 6536-6547. doi: <http://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0124.1>.
- Christian, H. J. (2003). Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector. *Journal of Geophysical Research*, 108(D1), 4005. doi: <http://doi.org/10.1029/2002JD002347>.
- Collier, A. B., Bürgesser, R. E. y Ávila, E. E. (2013). Suitable regions for assessing long term trends in lightning activity. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 92, 100-104. doi: <http://doi.org/10.1016/j.jastp.2012.10.012>.
- Cooray, V. (2015). *An introduction to lightning*. Springer. doi: <http://doi.org/10.1007/978-94-017-8938-7>.
- Del Genio, A. (2011). Will a warmer world be stormier? Consultado en <http://bit.ly/2xODlhj>.
- Díaz-Ortiz, F. y Roman, F. (2015a). Annual lightning events in Colombia: why are they increasing? Preliminary analyzes of some meteorological variables. En *2015 International Symposium on Lightning Protection (XIII SIPDA)* (pp. 379-386). Balneario Camboriu, Brasil. doi: <http://doi.org/10.1109/SIPDA.2015.7339324>.
- Díaz-Ortiz, F. y Roman, F. (2015b). Correlation between air surface temperature and lightning events in Colombia during the last 15 years. En *Asia Electromagnetics*

- Conference ASIAEM 2015 (pp. 112-115). Jeju, South Korea.
- Díaz-Ortiz, F. y Roman, F. (2018). Wavelet denoising using optimal selection of wavelet mother for compact intracloud discharges. En *34th International Conference on Lightning Protection (ICLP)* (pp. 1-4). Rzeszow, Poland. doi: <http://doi.org/10.1109/ICLP.2018.8503325>.
- Dwyer, J. R. y Uman, M. A. (2013). The physics of lightning. *Physics Reports*, *534*(4), 147-241. doi: <http://doi.org/10.1016/j.physrep.2013.09.004>.
- Kolmašová, I., Santolík, O., Defer, E., Rison, W., Coquillat, S., Pedebay, S., ... Pont, V. (2018). Lightning initiation: Strong pulses of VHF radiation accompany preliminary breakdown. *Scientific Reports*, *8*(1), 4-13. doi: <http://doi.org/10.1038/s41598-018-21972-z>.
- López, J. A., Montanyà, J., Der, O. Van, Romero, D., Aranguren, D., Torres, H., ... Marta, S. (2016). First data of the Colombia Lightning Mapping Array - COLMA. En *33rd International Conference on Lightning Protection*. Estoril, Portugal.
- Mushtak, V. C., Williams, E. R. y Boccippio, D. J. (2005). Latitudinal variations of cloud base height and lightning parameters in the tropics. *Atmospheric Research*, *76*(1-4), 222-230. doi: <http://doi.org/10.1016/j.atmosres.2004.11.010>.
- Price, C. (2009). Will a drier climate result in more lightning? *Atmospheric Research*, *91*(2-4), 479-484. doi: <http://doi.org/10.1016/j.atmosres.2008.05.016>.
- Secker, P. E. y Chubb, J. (1984). Instrumentation for electrostatic measurements. *Journal of Electrostatics*, *16*, 1-19.
- Stock, M. (2014). *Broadband interferometry of lightning*. Nuevo México: New Mexico Institute of Mining and Technology.
- Thomas, R. J., Krehbiel, P. R., Rison, W., Hunyady, S. J., Winn, W. P., Hamlin, T. y Harlin, J. (2004). Accuracy of the lightning mapping array. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, *109*(14), 1-34. doi: <http://doi.org/10.1029/2004JD004549>.
- Ushio, T., Wu, T. y Yoshida, S. (2015). Review of recent progress in lightning and thunderstorm detection techniques in Asia. *Atmospheric Research*, *154*, 89-102. <http://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.10.001>.