

ESTIMACIÓN DE LA EFICIENCIA DE ANTENAS DE CAMPO MAGNÉTICO CONECTADAS A UNA ESTACIÓN DE LA RED DE RAYOS BLITZORTUNG

ESTIMATION OF THE EFFICIENCY OF MAGNETIC FIELD ANTENNAS CONNECTED TO A BLITZORTUNG LIGHTNING NETWORK STATION

Cristhian Rubel Pomacaja Jiménez

Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia
crpomacajaj@correo.udistrital.edu.co

Herbert Enrique Rojas Cubides

Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia
herojasc@udistrital.edu.co

Recepción: 28/noviembre/2022

Aceptación: 22/diciembre/2022

Resumen

Entre los elementos más importantes de una red de detección y localización de rayos están las antenas de campo magnético, las cuales se acoplan a una etapa electrónica que filtra y amplifica las señales radiadas. La red abierta Blitzortung no es la excepción y, debido a su filosofía, promueve la mejora de su hardware y el uso de diversos tipos de sensores, aunque sus desarrolladores invitan a usar antenas de ferrita del tipo Mn-Zn. Este artículo presenta una metodología para estimar el porcentaje de detección (PD) de distintos tipos de antenas de campo magnético enlazadas a un nodo de medición de esta red. Adicionalmente, se analizan las ventajas de implementar una antena cuyo PD pueda equipararse al proporcionado por el hardware de referencia. La campaña de medición realizada durante una temporada de tormentas demostró que una antena del tipo Ni-Zn proporciona un buen comportamiento, alcanzado un PD del 47%.

Palabras clave: Antena, Blitzortung, campo magnético, ferrita Ni-Zn, loop sencillo.

Abstract

Among the most important elements of a lightning detection and localization network are the magnetic field antennas, which are coupled to an electronic stage

that filters and amplifies the signals radiated by the discharge. The Blitzortung open network is no exception and, due to its philosophy, it promotes the improvement of its hardware and the use of different types of sensors, although its developers suggest the use of Mn-Zn type ferrite antennas. This paper presents a methodology to estimate the percentage of detection (PD) of different types of magnetic field sensors linked to a measuring station of Blitzortung network. In addition, the advantages of implementing an antenna with a PD similar to that provided by the reference hardware are analyzed. The measurement campaign carried out during a season of thunderstorms showed that a Ni-Zn type antenna provides good performance, reaching a PD of 47%.

Keywords: *Antenna, Blitzortung, lightning, magnetic field, Ni-Zn Ferrite, single loop.*

1. Introducción

La importancia de conocer el comportamiento de las descargas eléctricas atmosféricas se debe a lo perjudicial que pueden ser tanto para la vida humana, como para la infraestructura eléctrica, las comunicaciones y otros sectores. Aunque el estudio de rayos posee un elevado nivel de madurez en países desarrollados como Estados Unidos, Suecia, Alemania, Italia, España y Japón, varios países tropicales y en vías de desarrollo han venido desarrollando acciones orientadas a la comprensión de este fenómeno natural y a mejorar la implementación de sistemas de protección contra rayos. Esto posee gran relevancia si se tiene en cuenta que países como Colombia poseen un alto nivel de actividad y una elevada densidad de descargas a tierra [Cruz-Bernal, 2018], [Herrera, 2018], [Rojas, 2018].

Debido a esto, el grupo de investigación GISE3-UD ha enfocado esfuerzos en implementar un nodo (estación de medición) perteneciente a la red abierta de detección y localización de rayos Blitzortung en Bogotá DC-Colombia. Esto con el fin de obtener información libre y sin restricciones sobre la actividad de las descargas atmosféricas tanto en una región específica, como en todo el territorio nacional.

Durante el proceso de implementación del nodo de medición, y como consecuencia de la reciente pandemia, los proveedores de las antenas de referencia del tipo Mn-

Zn (Manganeso-Zinc) suspendieron su fabricación, haciendo necesario explorar nuevas alternativas para las antenas de campo magnético. Dichos sensores deben ser diseñados para la detección de campo eléctrico o magnético en el rango de muy baja frecuencia (VLF: 3-30kHz) y baja frecuencia (LF: 30-300kHz), y además cumplir con ciertos requerimientos tales como la tensión máxima inducida en sus terminales, la frecuencia de corte y su impedancia.

Para suplir esta necesidad, en [Pomacaja, 2021] se presentó el proceso de diseño y construcción de un par de antenas de campo magnético que pueden ser usadas en la red Blitzortung. Estos sensores alternativos fueron una antena de ferrita del tipo Ni-Zn (Níquel- Zinc) y una antena tipo Loop de lazo sencillo, cuyos diseños se basaron en la aplicación de modelos electromagnéticos, incluyendo los factores de Nagaoka y Rosas para los sensores de ferrita. Asimismo, se demostró su validez luego de obtener un alto nivel de concordancia entre los valores teóricos y los resultados experimentales (errores por debajo de 7%).

Aunque las antenas desarrolladas por los colaboradores de Blitzortung poseen diversas topologías, pocos estudios se han orientado a evaluar la eficiencia de los sensores usados y su efecto en la detección de rayos. Uno de los aportes referentes en este aspecto se realizó en Japón y, aunque no se evaluó una estación particular, se comparó la eficiencia de la red Blitzortung instalada en el país con el sistema de detección y localización de rayos de la empresa TEPCO Power Grid® [Narita, 2018]. En dicho estudio se mostró como la eficiencia de detección aumentó de 12% a 24% luego de incluir 12 estaciones más a las inicialmente configuradas al arrancar del proyecto (en total 24 estaciones). No obstante, no se analizó la influencia del cambio de sensor y se mantuvo el diseño base usando antenas de Mn-Zn.

Por esta razón, y tomando como punto de partida la construcción del hardware diseñado por [Pomacaja, 2021], este trabajo propone una metodología para estimar el porcentaje de detección (PD) de antenas que pueden ser enlazadas directamente a un nodo de medición Blitzortung. Adicionalmente, se analizan las ventajas de implementar sensores de bajo costo cuya impedancia es similar a la antena de referencia y proporcionan un PD equiparable, aunque se deben tener en cuenta algunas limitaciones como su autonomía y sensibilidad.

2. Métodos

Descripción de la red Blitzortung

La red Blitzortung ha dispuesto de manera abierta a los interesados los diseños experimentales, así como las características de los dispositivos y/o elementos que componen sus estaciones. Los diseños iniciales fueron propuestos por los fundadores de la red y han venido evolucionando a través del tiempo. Adicionalmente, para constituirse como un sistema robusto de localización de rayos, emplea en sus algoritmos los métodos de tiempo de arribo (TOA) y tiempo de arribo grupal (TOGA) [Narita, 2018].

La estructura básica de un nodo de medición Blitzortung incluye sensores (un par de antenas de campo magnético o una antena de campo eléctrico), una etapa de adecuación de señales, una etapa de adquisición, una antena GPS, cables/sondas, un sistema de almacenamiento y un método de comunicación-transmisión de datos, generalmente Ethernet. De esta manera, la estructura general del nodo de medición GISE3-UD, implementado en Bogotá DC-Colombia, se muestra en la figura 1. En el caso de las antenas de campo magnético, como se mencionó previamente, este trabajo analiza el desempeño de las antenas de referencia (ferrita tipo Mn-Zn) y un par de alternativas diseñadas para el mismo propósito. Estas son del tipo ferrita Ni-Zn y tipo Loop de lazo sencillo. Su proceso de diseño y construcción se describe en [Pomacaja, 2021].

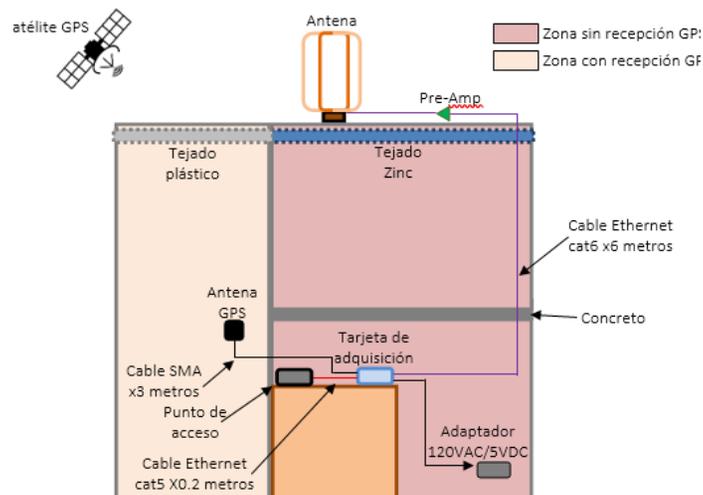


Figura 1 Estructura y conexión del nodo Blitzortung GISE3-UD.

Por otra parte, para recolectar información confiable es necesario, además de instalar la estación en un lugar óptimo, garantizar que todos sus componentes funcionen de forma continua. Para el caso de la antena GPS, esta debe quedar cerca a la estación ya que el cable que conecta la antena y el puerto SMA genera atenuaciones considerables a medida que aumenta su longitud. Adicionalmente, debe quedar en un sitio descubierto para que pueda conectarse rápidamente a los satélites de posición, y así, brindar información sobre la fecha y hora en la que se están registrando las mediciones.

Para el caso de las antenas de campo magnético, lo ideal es que estén alejadas de fuentes de ruido electromagnético considerables que provoquen que la estación entre en estado de interferencia, lo cual automáticamente la inhabilita de la red. En este caso, para estimar el porcentaje de detección (PD) de cada estación, las antenas de campo magnético fueron ubicadas al aire libre en el techo de una vivienda de tres niveles, aproximadamente 10 metros sobre el nivel del suelo. Adicionalmente, se protegió la electrónica usando carcazas metálicas y eviando su exposición directa a condiciones ambientales extremas.

Finalmente, para conectar la estación a la red y enviar las señales medidas se utilizó un cable tipo CAT6 y un Router con conexión a internet. Una vez realizadas estas conexiones, se procede a configurar y poner en marcha la estación. La figura 2 muestra un diagrama completo de dicho proceso.

Para garantizar un enlace adecuado con la red mundial, el proceso de configuración inicia verificando el normal funcionamiento del hardware y visualizando el estado del nodo (estación) como “on-line” o “activa” en la página web de Blitzortung (<https://www.lightningmaps.org>). A través de esta conexión, y usando la interfaz disponible, es posible configurar la estación e identificar errores de conexión. Un ejemplo de esto se muestra en la figura 3 y se pueden observar ítems tales como: el modo de funcionamiento, manual o automático; señales recibidas y enviadas; errores; el servidor al que se está conectado; y el estado del GPS, además de los satélites que este detecta. Luego de este proceso, se debe ajustar la ganancia de las antenas, ya que, aunque la antena esté ubicada lejos de posibles fuentes de ruido, si esta no es la adecuada se pueden captar señales que generen

interferencia. De acuerdo a esto, se debe identificar la ganancia que permite a la estación trabajar de manera óptima y acoplarse de buena manera a las etapas de adecuación de señal y de almacenamiento de información.

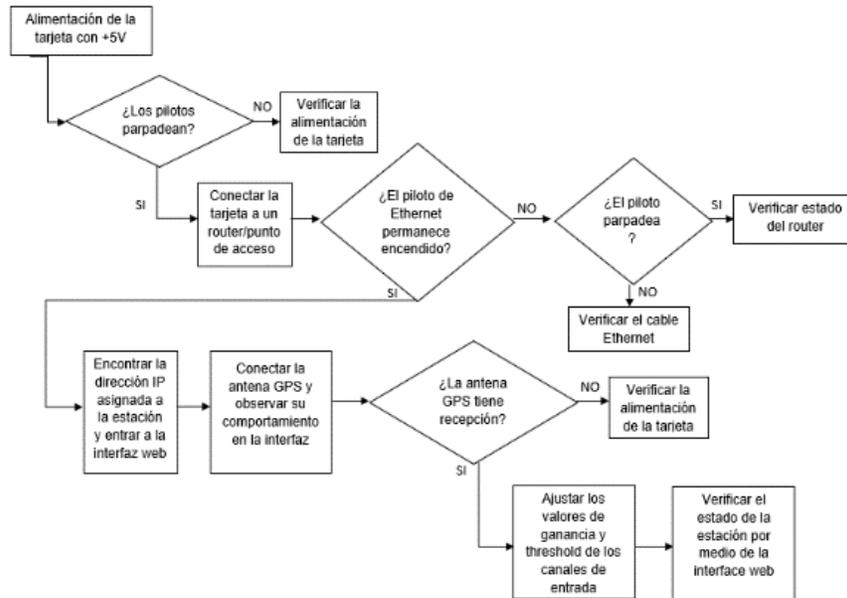


Figura 2 Diagrama de configuración y puesta en marcha del nodo Blitzortung.

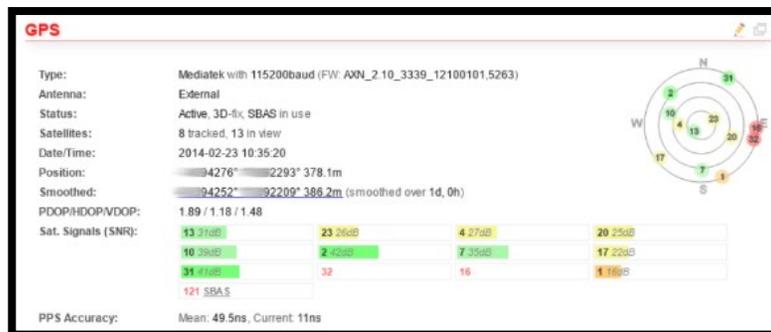
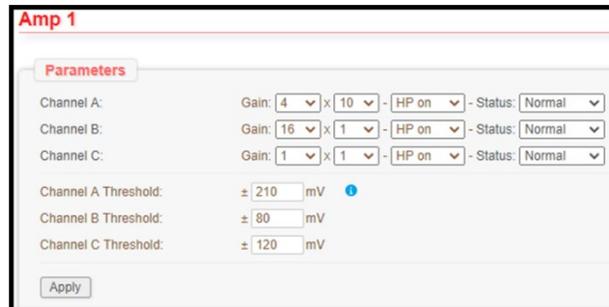


Figura 3 Estado de la estación y su conexión GPS.

Dentro de las opciones que ofrece Blitzortung existen algunas que se recomienda no modificar a menos que sea necesario por temas de experimentación. Para las pruebas realizadas en este trabajo se utilizaron las opciones que permiten cambiar la ganancia y el umbral (trigger/threshold) para la recepción de señales. De esta forma, es posible utilizar dos tipos de operación en la estación, el modo automático y el modo manual

Aunque el primer modo aún presenta fallas en su operación, este permite buscar la mejor configuración de ganancia y threshold para cada canal (señales captadas por las antenas). Este modo permite cambiar la ganancia hasta en 21 valores diferentes. Sin embargo, se debe tener cuidado con su manipulación ya que ganancias altas pueden saturar la electrónica y provocar que las señales de entrada sobrepasen su límite (maxima amplitud ± 1.35 V). Se recomienda usar el modo automático al inicio ya que sirve de guía para estimar un conjunto de valores que garanticen el buen funcionamiento de la estación. Luego, estos pueden ser fijados con ayuda del modo manual. Un ejemplo de la configuración de ganancia y umbral se muestra en la figura 4 y hace referencia a dos antenas de campo magnético (canales A y B).



The screenshot shows a configuration window titled "Amp 1" with a "Parameters" tab. It contains settings for three channels:

Channel	Gain	HP on	Status	Threshold
Channel A:	4 x 10	HP on	Normal	± 210 mV
Channel B:	16 x 1	HP on	Normal	± 80 mV
Channel C:	1 x 1	HP on	Normal	± 120 mV

An "Apply" button is located at the bottom left of the configuration area.

Figura 4 Configuración de ganancia y umbral para las entradas de las antenas (canales).

Finalmente, a través del modulo de visualización mostrado en la figura 5 se pueden revisar las formas de onda de los eventos registrados por las antenas. En dicho módulo, se mostrarán señales que pueden o no ser generadas por rayos nube-tierra, siempre y cuando estas hayan superado el umbral establecido. Adicionalmente, se muestra una línea horizontal que marca los niveles de ruido (Noise Floor) que hay en el ambiente. La documentación encontrada en el foro de Blitzortung recomienda que el valor de tensión del threshold sea al menos el doble de los niveles de ruido. Estos pueden variar dependiendo del tipo de antena que se utilice y la ganancia definida.

En esta sección es también posible generar una señal de prueba (senoidal de amplitud constante y frecuencia variable) usando como fuente la antena GPS. De este modo, se tiene noción del comportamiento de las antenas con respecto a la

frecuencia. Otros datos adicionales que se pueden encontrar en esta interfaz son: la cantidad de muestras tomadas por canal, el tiempo que tarda el procesador en digitalizar la señal y el número de muestras incluidas antes de que la señal supere el umbral. Asimismo, se observa en la parte superior de la gráfica la estampa de tiempo en la que la señal fue adquirida.

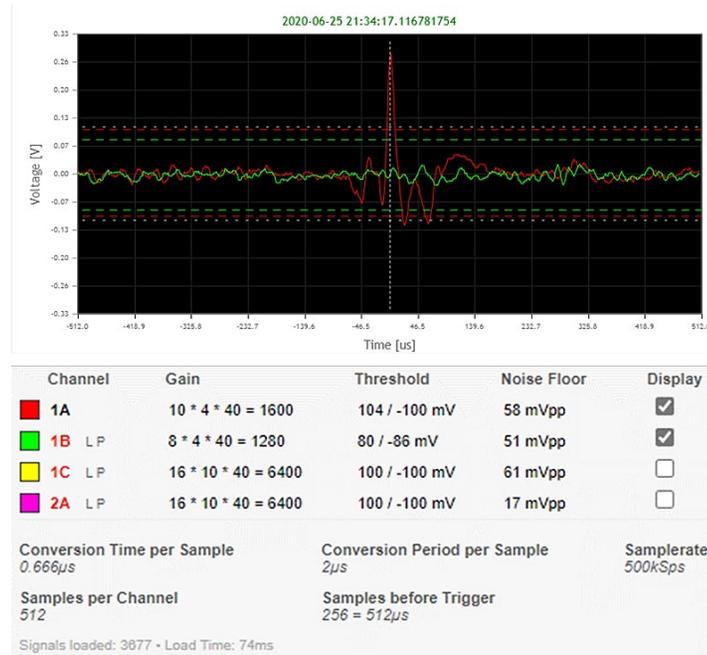


Figura 5 Módulo de visualización de señales.

En la literatura es posible encontrar que la eficiencia de detección de una estación de medición depende, en buena medida, del acople entre el sensor y la electrónica. Esto hace referencia a las pérdidas debido a reflexiones y atenuaciones del sistema completo, así como la sensibilidad del sensor y su ancho de banda. Con base en esta información, se pueden aplicar diversos métodos para estimar la eficiencia de los sistemas de detección y localización de rayos basados, buena parte de ellos, en el uso de la corriente pico de las descargas detectadas por los nodos de la red [Cummins, 2009]. Lo anterior, sin importar el método que se esté aplicando para el proceso de localización (TOA o TOGA).

Para el caso específico de Blitzortung o LightningMaps (anexo a la página oficial "Blitzortung.org") se pensaba inicialmente que se podrían utilizar los datos

disponibles en su página web. No obstante, la limitación de no tener datos históricos de las señales enviadas por cada estación, o la corriente de un evento registrado, dificulta la aplicación cualquier algoritmo. Ahora bien, aunque no puede definirse estrictamente como eficiencia de detección, en esta sección se plantea una metodología para cuantificar el desempeño de la estación implementada en Bogotá usando los diferentes tipos de antenas.

De esta manera, se estimará el porcentaje de eventos detectados por una estación determinada con respecto al total de eventos detectados por la red en un área definida. A este parámetro se le denominará porcentaje de detección, y los requisitos, las herramientas y la metodología empleada para obtener este porcentaje se describen a continuación.

Selección de la zona de interes (zona de influencia)

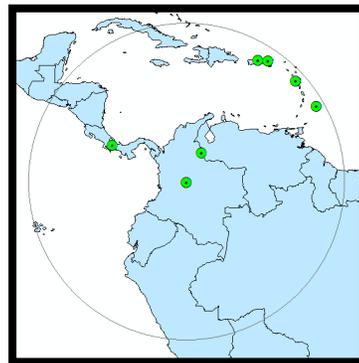
Blitzortung permite obtener datos de las descargas (return strokes) detectadas por la red, de manera que cada sensor tiene diferentes coberturas y regiones de activación establecidas a criterio de los administradores. Por esta razón, una estación ubicada en el Caribe podría llegar a detectar una señal proveniente de Europa o Africa. Por esta razón, el primer paso para estimar el PD de un nodo de medición debe ser limitar la zona de influencia a un área cuyo punto central será la estación GISE3-UD. Posteriormente, se definen estrategias para recolectar los datos de la estación. Lo anterior, teniendo en cuenta el uso de las antenas de ferrita Mn-Zn, ferita Ni-Zn y la antena tipo Loop sencillo.

Una vez entró en funcionamiento la estación GISE3-UD, se limitó la zona de influencia usando una circunferencia de 2000 km de radio dentro de la cual existen otras estaciones que cooperan entre sí para detectar un rayo. A pesar que los algoritmos utilizados por Blitzortung (TOA y TOGA) requieren de 8 a 12 estaciones para un funcionamiento óptimo, y que dentro del área seleccionada no se cuentan con este número de nodos activos, la configuración de la red garantiza que al menos una estación de este grupo siempre detecta un rayo ocurrido en la región. Esto se debe a la gran cantidad de sensores instalados en los EEUU, los cuales registran constantemente señales en sus vecindades.

Por otro lado, se escogió esta distancia con base a estimaciones de los desarrolladores de la estación y a que esta zona encierra una superficie similar de tierra y mar, lo que al final podría evidenciar la cantidad de señales que se propagan por cada medio. Aunque las estadísticas dadas por LightningMaps muestran que las estaciones activas pueden llegar a detectar señales más allá de los 10000 km, se tomó una distancia reducida.

Cabe mencionar que el área definida cubre parte de Norte América (región definida por Blitzortung), la cual incluye también una porción de Sur América, figura 6a, facilitando así la adquisición de datos. El área final seleccionada se muestra en la figura 6b y dentro de ella se identificaron las siguientes estaciones activas:

- Bogotá UN (Estación de la Universidad Nacional).
- Cúcuta UN (Estación de la Universidad Nacional ubicada en Cúcuta).
- Volcán (Estación ubicada en Panamá y propiedad de Jay Mills).
- San Juan (Estación ubicada en Puerto Rico y propiedad del servicio de meteorología "Hector's Weather").
- St Thomas (Estación ubicada en las Islas Vírgenes de los Estados Unidos y propiedad del servicio de meteorología "Hector's Weather").



a) Zona Norteamérica en LightningMaps b) Área de detección para pruebas

Figura 6 Zona Norteamérica en LightningMaps y área de detección para pruebas.

Aunque existen otras antenas ubicadas en Bogotá, Puerto Plata, Vieux-Habitants y Barbados, para el momento de este estudio permanecieron desactivadas por un periodo considerable o estuvieron activas de manera intermitente. Por esta razón, no se incluyeron para el cálculo del PD. Asimismo, la elección del área de interés

permite obtener datos de tormentas tanto como en la zona caribe como en la parte continental de Suramérica. La elección de esta zona en particular puede servir para trabajos futuros donde se analice el cambio en el PD debido a la localización de tormentas o la inclusión de nuevas estaciones de medición. Por el momento, estos aspectos salen del alcance de este trabajo.

Adquisición de información

La plataforma LightningMaps ofrece una herramienta con la cual es posible identificar return strokes dentro de un área circular definida por el usuario. Asimismo, permite elegir una ventana de tiempo en la que se puede observar cada evento e identificar qué estaciones estuvieron involucradas en la detección. Sin embargo, una limitante de esta plataforma es que no permite descargar la información en formatos de fácil procesamiento (CSV o de texto). De esta manera, si se quisiera realizar una estimación del PD se deben organizar tablas manualmente, copiando la información de cada evento, y haciendo el proceso poco práctico. Esto es más relevante si se considera que por cada hora podrían ocurrir cientos de eventos.

Por otra parte, en la página de Blitzortung se tiene una opción llamada “*Archivo de datos personalizados*”, la cual tiene funciones similares a las de LightningMaps con la excepción que los datos se dan en un área cuadrada y es posible descargar la información en formato CSV. No obstante, este archivo solo indica la posición de cada evento, mas no indica qué estaciones estuvieron involucradas en la detección, lo cual tampoco proporciona la información necesaria para determinar el PD.

Descartadas estas dos herramientas, se utilizó directamente la base de datos de rayos de Blitzortung, a la cual se puede acceder a través de la URL data.blitzortung.org. Esta alternativa es capaz de entregar datos de todos los rayos identificados, incluyendo el ID de las estaciones que los detectaron dentro de una ventana de tiempo que va desde 2013 hasta la actualidad. Esto permite recolectar datos masivos de cualquier estación durante el periodo que ha estado en funcionamiento.

Para seleccionar la región de trabajo, a la anterior URL se le agrega un slash “/” y la palabra “Data_X”, donde X representa cada región del mundo con un número del

1 al 7, siendo Norte América la número 3. De esta forma, se muestran los datos organizados por año, mes, día, hora y minutos, siendo estos últimos en saltos de 10 en 10. Cada archivo contiene diez minutos de datos para una fecha y hora específica y se indica qué estación vio un stroke, además de los datos de latitud, longitud y estampa de tiempo.

Opciones para la estimación del PD

El cálculo del PD se obtuvo de dos formas. En la primera, se tienen en cuenta la totalidad de los eventos detectados dentro de la zona de interés (en uno o varios periodos de tiempo). De esta forma, el cálculo del PD será igual a la cantidad de eventos detectados de cada estación dividido por el número total de eventos registrados por la red completa. En la segunda forma, se graficó el comportamiento de la actividad de rayos con respecto a la distancia, por lo que la circunferencia de medición se dividió en 10 anillos con una separación entre radios de 200 km. La disposición de estos anillos se muestra en la figura 7. Ambos procedimientos se aplicarán para cada tipo de antena utilizada.

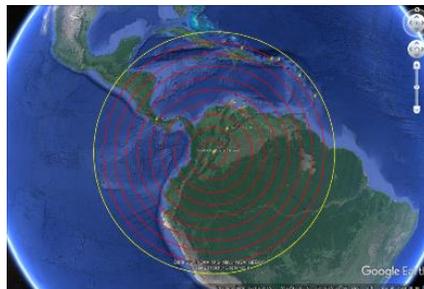


Figura 7 Zonas de medición para determinar PD de estaciones Blitzortung en la región.

Procesamiento de información de la red Blitzortung

Puesto que Blitzortung no dispone de una interfaz gráfica eficiente para la delimitación del área de interés, se desarrolló un algoritmo en MATLAB® con el cual se descargan y procesan los datos. Posteriormente, se filtran los rayos fuera del área limitada y se procede a calcular el PD de cada estación por medio de una tabla de “unos y ceros” donde “1” representa la detección de un rayo y “0” lo contrario. El algoritmo se resume de la siguiente forma:

- Borrar archivos residuales de pruebas anteriores.
- Seleccionar la fecha y la hora de la cual se quieren adquirir los datos.
- Realizar la conexión con el servidor usando un nombre de usuario y contraseña.
- Realizar la petición de archivos con formato .log de la hora especificada anteriormente.
- Guardar los archivos .log en el disco como archivos temporales.
- Leer el archivo .log como una matriz cuyos datos sean separados por columnas y cada fila representen un stroke detectado.
- En cada fila de la matriz creada, la cual será nombrada MA, buscar el número que corresponde a las estaciones utilizadas como comparación.
- Se crea otra matriz, la cual será nombrada MB, la cual tiene como columnas los nombres de cada estación.
- Si en alguna fila de la MA aparece el número de alguna estación de la MB, se agregará automáticamente un 1 en su columna correspondiente.
- Obtener la matriz de unos y ceros con la que es posible obtener un resultado de PD general y uno dado por las zonas de detección anteriormente mencionadas.

Para validar el proceso de adquisición con este algoritmo, se realizó una comparación con el método de captura manual. Para esto, se recolectaron los datos de 475 eventos que incluyen la información de posición y tiempo de ocurrencia del stroke. Las fechas en las que se recolectaron los datos para así validar el algoritmo se muestran en la tabla 1.

Tabla 1 Periodos de adquisición de información para la validación del algoritmo.

Fecha	Hora
23/04/2020	20:00 – 22:00
24/04/2020	20:00 – 22:00
26/04/2020	20:00 – 22:00
06/06/2020	22:00 – 23:00
06/07/2020	20:00 – 22:00
06/09/2020	15:00 – 16:00

Mientras un ejemplo de cómo se visualizan los datos recolectados se presenta en la tabla 2.

Tabla 2 Ejemplo de resultados recolectados utilizando el algoritmo.

Fecha: 2020/07/25/00								
GISE3 UD	BOG UN	CUCUTA UN	VOLCAN	SAN JUAN	ST THOMAS	Latitud	Longitud	Hora
1	0	1	0	0	1	20.0657	-81.1206	00:19.9
1	0	0	1	0	1	20.9815	-81.4544	00:47.0
0	0	0	1	0	1	20.9409	-81.4319	00:47.1
1	0	1	1	0	1	20.2305	-81.4254	01:12.6
1	0	0	1	1	1	20.1991	-80.8572	01:24.3

Luego de aplicar el método descrito, la suma total de los eventos detectados fue de 492, lo que representa una diferencia del 3.6%, la cual puede considerarse baja considerando la cantidad de datos analizados. Sin embargo, este error no es propio del algoritmo, se debe una diferencia entre los datos que se descargan del servidor de Blitzortung y los datos entregados por LightningMaps.

3. Resultados

PD usando antenas de ferrita tipo Mn-Zn

Para realizar las pruebas con las antenas de ferrita, primero se configuró la ganancia de la antena y el umbral de disparo. Siendo dos antenas, una en dirección Este-Oeste y otra Norte-Sur, se utilizó el modo automático para establecer los valores adecuados y luego cambiar al modo manual. La ganancia de ambas antenas fue 4x10 lo cual, sumado a la ganancia del amplificador y el filtro de la tarjeta de adquisición, dio como resultado 1600. Asimismo, se utilizó un umbral de 210 mV. Las fechas de las sesiones en las que se tomaron datos se muestran en la tabla 3.

Tabla 3 Sesiones de medición de antenas de ferrita Mn-Zn.

Sesión	Fechas
1	25 julio 2020 – 27 julio 2020
2	1 agosto 2020 – 4 agosto 2020
3	13 octubre 2020 – 15 octubre 2020

Mientras los resultados del PD usando las antenas de ferrita Mn-Zn se incluyen en la tabla 4 y la tabla 5. Es importante mencionar, para este caso y los siguientes, que la "X" incluida en las tablas indica que la estación estaba inactiva durante la sesión correspondiente.

Tabla 4 PD de las estaciones usando antenas de ferrita Mn-Zn en GISE3-UD.

Sesión 1						
	GISE3-UD	BOG UN	Cúcuta	Volcán	San Juan	St. Thomas
# de Strokes	6708	448	4015	4093	3894	8559
PD	70.10%	4.68%	41.96%	42.77%	40.69%	89.45%
Strokes totales	9568					
Sesión 2						
	GISE3-UD	BOG UN	Cúcuta	Volcán	San Juan	St. Thomas
# de Strokes	3500	242	2396	2080	269	5420
PD	58.01%	4.01%	39.71%	34.47%	4.45%	89.84%
Strokes totales	6033					
Sesión 3						
	GISE3-UD	BOG UN	Cúcuta	Volcán	San Juan	St. Thomas
# de Strokes	6544	2155	X	3166	0	X
PD	91.98%	30.29%	X	44.50%	0%	X
Strokes totales	7114					

Tabla 5 PD por rango de distancias usando antenas de ferrita Mn-Zn en GISE3-UD.

Rangos de medición [km]	Sesión 1		Sesión 2		Sesión 3	
	PD [%]	Número de Strokes	PD [%]	Número de Strokes	PD [%]	Número de Strokes
0 – 200	0	9	x	x	x	X
200 – 400	50.02	18	33.33	24	75.04	4
400 – 600	71.07	121	75.00	208	87.30	63
600 – 800	82.04	518	82.33	317	91.37	487
800 – 1000	87.78	835	75.94	212	87.87	841
1000 – 1200	89.10	982	83.70	178	92.49	373
1200 – 1400	88.78	660	75.24	206	92.19	615
1400 – 1600	83.84	885	76.01	692	94.37	836
1600 – 1800	72.48	1912	58.15	1687	92.24	1431
1800 – 2000	51.43	3628	43.96	2509	92.57	2464
0-2000	70.10	6708	58.01	3500	91.98	6544

Respecto a la tabla 4, se puede evidenciar el buen comportamiento que tiene este tipo de antenas con la estación GISE3-UD, y en general, con toda la red. El PD reportado para la estación GISE3-UD (entre 58 y 92%) contrasta con el bajo valor de la estación Bogotá-UN (entre 4 y 30%), cuya ubicación es prácticamente la misma (separación 15 km aprox.). Esto puede deberse a un elevado nivel de ruido en las vecindades de dicha estación, lo que provoca que dicho nodo entre en estado

de interferencia. Algo similar ocurre con las estaciones San Juan y St. Thomas dispuestas una ubicación que debería facilitar la detección de rayos (trópico, zona costera). Sin embargo, la diferencia en el PD es significativa a favor de la estación St. Thomas. Esto demuestra que, independientemente de la ubicación, es necesaria una correcta configuración de la estación.

Algo a destacar durante la sesión de medición 3 es que cuando las estaciones Cúcuta y St. Thomas dejaron de funcionar, debido a problemas locales, los porcentajes de las estaciones de Bogotá aumentaron entre 20% y 30%. Esto se puede deber a que, al evidenciar la ausencia de una estación, el algoritmo de Blitzortung toma información con ruido proveniente de otras estaciones. Esto, siempre y cuando el evento ocurra en un tiempo consistente con el detectado por las demás estaciones.

Respecto a la tabla 5, para la estación GISE3 se puede observar un PD similar en las tres sesiones de medición, especialmente a distancias moderadas y grandes. A partir de estos resultados, es posible afirmar que este factor no se ve afectado significativamente por la distancia, siendo en todos los casos el rango de 0 a 200 km como el que exhibió el porcentaje más bajo. Asimismo, en las tres sesiones se pudo observar que en el rango de medición 1000-1200 km es el que exhibe el mayor valor. Esta zona coincide con aquella que abraza mayor superficie de mar en comparación con el área terrestre, tal como se muestra en la figura 8.



Figura 8 Área cubierta por anillo de 1000-1200 km desde la ubicación GISE3-UD.

El rango 1800-2000 km fue en el que se obtuvo mayor variación del PD. Esto puede ser debido a la influencia de algunas estaciones ubicadas en USA, las cuales, al

estar más cerca de los eventos reportados, obtienen señales de mejor calidad, propiciando que el algoritmo utilice las señales reportadas por esos nodos.

PD usando antenas de ferrita tipo Ni-Zn

Estas antenas también fueron ubicadas en sentido Norte-Sur y Este-Oeste y se realizaron tres sesiones de medición. Al haber sido diseñadas con una inductancia similar a las antenas de Mn-Zn, se probaron usando la misma configuración experimental, aunque en este caso se fijó un umbral de 100 mV. La tabla 6 sintetiza la información de las sesiones de medición, mientras los resultados generales y por rangos de medición se muestran en la tabla 7 y la tabla 8, respectivamente. De los resultados mostrados en la tabla 7 se aprecia que, a pesar de tener características eléctricas similares a las antenas de Mn-Zn, las nuevas antenas muestran una menor eficiencia de detección para la estación, alcanzando un PD del 47%. Cabe señalar que durante estas pruebas se registraron menos strokes, debido en parte a la época del año, ya que los meses de marzo y abril anteceden la primera temporada con mayor actividad de rayos en Colombia que ocurre en mayo--junio.

Tabla 6 Sesiones de medición de antenas de ferrita Ni-Zn.

Ganancia	Sesión	Fechas
4X10	1	13 marzo 2021 – 15 marzo 2021
	2	8 abril 2021 – 10 abril 2021
	3	14 abril 2021 – 16 abril 2021

Tabla 7 PD de las estaciones usando antenas de ferrita Ni-Zn en GISE3-UD.

Sesión 1						
	GISE3-UD	BOG UN	Cúcuta	Volcán	San Juan	St. Thomas
# de Strokes	681	138	836	808	24	1904
PD	31.45%	6.37%	38.61%	37.32%	1.10%	87.94%
Strokes totales	2165					
Sesión 2						
	GISE3-UD	BOG UN	Cúcuta	Volcán	San Juan	St. Thomas
# de Strokes	1218	322	2014	1484	0	3203
PD	34.80%	9.20%	57.55%	42.41%	0%	91.54%
Strokes totales	3499					
Sesión 3						
	GISE3-UD	BOG UN	Cúcuta	Volcán	San Juan	St. Thomas
# de Strokes	1484	326	1395	1162	0	2344
PD	46.66%	10.25%	43.86%	36.54%	0%	73.71%
Strokes totales	2678					

Tabla 8 PD por rango de distancias usando antenas de ferrita Mn-Zn en GISE3-UD.

Rangos de medición [km]	Sesión 1		Sesión 2		Sesión 3	
	PD [%]	Número de Strokes	PD [%]	Número de Strokes	PD [%]	Número de Strokes
0 – 200	0	0	5.88	17	2.56	9
200 – 400	15.76	203	61.53	156	67.42	83
400 – 600	14.07	334	65.76	444	64.23	408
600 – 800	4.190	334	51.64	273	47.97	238
800 – 1000	2.066	242	68.02	344	14.70	590
1000 – 1200	39.62	159	59.53	257	67.26	427
1200 – 1400	24.29	107	25.41	606	54.50	1127
1400 – 1600	53.07	260	17.39	345	39.59	1020
1600 – 1800	68.23	318	9.96	311	55.00	1019
1800 – 2000	70.55	197	7.50	746	45.73	1332
0 – 2000	31.45	2165	34.80	3499	46.66	2678

Entre tanto, las tormentas analizadas durante las pruebas se originaron hacia el sur del área de medición, lo cual puede ser otro factor influyente, ya que la baja cantidad de strokes detectados pudo deberse a que las señales bajo estudio son atenuadas por mayor cantidad de obstáculos antes de llegar a una estación de medición. No obstante, la reducción del PD este tipo de antena se pueden considerar una solución alternativa al diseño original, fácil de construir (aplicando el diseño sugerido) y con un precio de construcción 70% menor.

Según se muestra en la tabla 8, el PD de la estación GISE3-UD con antenas de Ni-Zn tiene un comportamiento variable y no exhibe una tendencia cierta a medida que la distancia incrementa. Por ejemplo, en la sesión 3, para el rango de 800-1000 km se tiene un PD de 14.7% y luego aumenta hasta 67%. Dejando esto de lado, se puede evidenciar un porcentaje de detección aceptable (31.4% en promedio), incluso similar al de estaciones como Volcán (39%) o Cúcuta (46%). Esto es relevante si se tiene en cuenta que la primera usa antenas multi-loop y la segunda usa tres antenas de ferrita Mn-Zn más una antena adicional de campo magnético.

PD usando antenas tipo Loop

En un principio se realizaron las pruebas usando la misma ganancia que las antenas de ferrita (4X10X40) y cambiando el Threshold a 500 mV para evitar el modo interferencia. Sin embargo, de las pruebas realizadas se observó que las antenas (ubicadas de forma ortogonal) tienen mejor desempeño configurándolas a

una ganancia de 2x5 y un umbral de 210 mV. Adicionalmente, era necesario especificar en la página de Blitzortung que se están utilizando Loops de cable Coaxial. La información y los resultados obtenidos después de las sesiones de medición se muestran en tablas 9 y a la 11.

Tabla 9 Sesiones de medición de antenas tipo loop sencillo.

Ganancia	Sesión	Fechas
2x5	1	1 octubre 2020 – 3 octubre 2020
	2	10 octubre 2020 – 12 octubre 2020
	3	22 octubre 2020 – 24 octubre 2020

Tabla 10 PD de las estaciones usando antenas tipo loop en GISE3-UD.

Ganancia 2x5 – Trigger 210mV						
Sesión 1						
	GISE3-UD	BOG UN	Cúcuta	Volcán	San Juan	St. Thomas
# de Strokes	352	331	4143	3736	1557	7133
PD	3.61%	3.40%	42.56%	38.38%	15.99%	73.28%
Strokes totales	9733					
Sesión 2						
	GISE3-UD	BOG UN	Cúcuta	Volcán	San Juan	St. Thomas
# de Strokes	483	418	X	2252	1199	5473
PD	7.61%	6.58%	X	35.49%	18.89%	86.27%
Strokes totales	6344					
Sesión 3						
	GISE3-UD	BOG UN	Cúcuta	Volcán	San Juan	St. Thomas
# de Strokes	397	1458	4395	2108	2169	X
PD	6.34%	23.31%	70.28%	33.71%	34.68%	X
Strokes totales	6253					

Tabla 11 PD por rango de distancias usando antenas tipo loop en GISE3-UD.

Rangos de medición [km]	Sesión 1		Sesión 2		Sesión 3	
	PD [%]	Número de Strokes	PD [%]	Número de Strokes	PD [%]	Número de Strokes
0 – 200	20	5	0	9	0	9
200 – 400	15.21	46	12.76	94	34.93	83
400 – 600	23.52	153	20.39	152	33.57	408
600 – 800	7.47	468	17.24	429	10.08	238
800 – 1000	4.31	440	14.73	638	8.98	590
1000 – 1200	3.85	830	10.57	501	8.89	427
1200 – 1400	4.40	1135	7.76	605	4.34	1127
1400 – 1600	3.62	1075	6.39	1251	2.35	1020
1600 – 1800	1.90	2104	3.49	1574	1.86	1019
1800 – 2000	2.67	3477	3.39	1091	1.8	1332
0 – 2000	3.61	9733	7.61	6344	6.34	6253

Aunque la antena tiene una impedancia muy similar a la impedancia de la entrada de la electrónica (75Ω), y se esperaba que el rendimiento fuese más alto, los resultados incluidos en la tabla 10 muestran que estas antenas poseen el menor PD (entre 3 y 8%) entre los tres tipos estudiados. La validez de estos datos se sustenta en que los PD de las demás estaciones mantuvieron niveles similares a los obtenidos con las antenas Mn-Zn. En este caso, las estaciones más estables son Volcán (PD promedio 35%) y St. Thomas (PD promedio 80%), siendo esta última la que reporta mejor PD.

Por otro lado, San Juan podría identificarse como la más inestable con valores que oscilan entre 16 y 35%.

Un resultado adicional a destacar para la estación GISE3-UD es que los PD más altos fueron obtenidos en las sesiones 2 y 3 (entre 6 y 8%), cuando las estaciones de Cúcuta y St. Thomas estuvieron inactivas. Este comportamiento es similar al observado en la prueba con las antenas de ferrita, aunque el aumento solo fue de 4 puntos porcentuales. Esto ocurre también con la estación San Juan y St. Thomas. De esta forma, cuando la última está inactiva, el PD de San Juan aumenta de 19 a 35%. Finalmente, la tabla 11 muestra que el PD de la estación GISE3-UD mejora para distancias cercanas usando las antenas tipo loop. Esto se precia mucho más en el rango de 400-600 km (alcanzando 23.5%) y se puede deber a que se cubre parte del mar pacífico y el lago de Maracaibo, lugares donde existe una elevada actividad de descargas atmosféricas.

4. Discusión

En este artículo presenté un método para determinar el porcentaje de detección (PD) de dos prototipos de antenas de campo magnético (ferrita Ni-Zn y tipo loop) que pueden ser usadas en una estación de la red abierta de detección y localización de rayos Blitzortung. Con esto, se comprueba que ambos tipos de antenas pueden funcionar con la red, aunque con un margen de diferencia a favor de las que usan ferrita. Adicionalmente se observó la importancia de una correcta configuración de la estación, la cual debe ajustarse según el tipo de antena que se utilice, ya que no es recomendable dejar que el sistema Blitzortung lo haga automáticamente.

5. Conclusiones

Las conclusiones más relevantes de este trabajo son las siguientes:

- El PD obtenido para las antenas del tipo Ni-Zn muestra que no es necesario construir antenas de gran tamaño o utilizar todos los canales disponibles de la estación, ya que, si la estación no es configurada adecuadamente, la estación captará ruido, reduciendo así su PD. Aunque durante las pruebas se obtuvo un PD promedio de 32%, las sesiones dos y tres muestran que este puede llegar ser equiparable al de las antenas Mn-Zn (hasta 50% aproximadamente).
- Buena parte de la diferencia en el PD obtenida con las antenas de ferrita Mn-Zn y Ni-Zn se debe a la época en la cual se hicieron las mediciones y a la ocurrencia de un mayor número de descargas en la zona sur del continente. Esto pudo atenuar las señales generadas por los rayos, y con ello, disminuir el número de eventos detectados.
- A pesar de que el PD de las antenas tipo loop es menor al obtenido con las antenas Ni-Zn y Mn-Zn, el costo final de estas es muy bajo. Asimismo, los materiales utilizados pueden adquirirse fácilmente en el comercio y no se requiere de equipos especializados para su construcción. Su implementación, aumentando el número de vueltas de cable coaxial, puede ser una alternativa de bajo costo para poner en funcionamiento un nodo de medición.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Cruz-Bernal, A. S., Torres-Sánchez, H., Aranguren-Fino, H., & Inampué-Borda, J. C. Lightning mortality rate in Colombia for the period 1997 –2014. *Revista UIS Ingenierías*, 17(2), 65–74, 2018. <https://doi.org/10.18273/revuin.v17n2-2018006>.
- [2] Cummins, K. L., & Murphy, M. J. An overview of lightning locating systems: History, techniques, and data uses, with an in-depth look at the U.S. NLDN. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 51(3), 499–518, 2009. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2009.2023450>.

- [3] Herrera, J., Younes, C., & Porras, L. Cloud-to-ground lightning activity in Colombia: A 14-year study using lightning location system data. *Atmospheric Research*, 203, 164–174, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.12.009>.
- [4] Narita, T., Wanke, E., Sato, M., Sakanoi, T., Kumada, A., Kamogawa, M., Hirohiko, I., Harada, S., Kameda, T., Tsuchiya, F., & Kaneko, E. A study of lightning location system (Blitz) based on VLF sferics. 34th International Conference on Lightning Protection (ICLP), 2018. <https://doi.org/10.1109/ICLP.2018.8503311>.
- [5] Pomacaja, C. R., & Rojas, H. E. Diseño de antenas de campo magnético compatibles con una estación de la red de detección y localización de rayos Blitzortung. In UAM Azcapotzalco (Ed.), XVII Semana Nacional de Ingeniería Electrónica y II Semana Iberoamericana de Ingeniería Electrónica (SENIE 2021), 1–21, 2021.
- [6] Rojas, H. Técnicas avanzadas para el tratamiento y procesamiento de señales de campos electromagnéticos generados por rayos. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Colombia, 2018.