DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA BASADA EN PYTHON PARA ESTIMAR LA EFICIENCIA DE DETECCIÓN EN SISTEMAS DE LOCALIZACIÓN DE RAYOS

DEVELOPMENT OF A PYTHON-BASED TOOL FOR ESTIMATION OF DETECTION EFFICIENCY IN LIGHTNING LOCATION SYSTEMS

Rominger Buritica Angulo
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia
rburiticaa@udistrital.edu.co

Brenda Vannessa Aza Beltrán
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia
bvazab@udistrital.edu.co

Herbert Enrique Rojas Cubides
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia
herojasc@udistrital.edu.co

Recepción: 16/noviembre/2024 **Aceptación:** 16/abril/2025

Resumen

Los sistemas de localización de rayos (LLS) son redes de medición avanzada para detectar y ubicar descargas eléctricas atmosféricas. Estos sistemas son cruciales para prevenir y mitigar daños causados por estos fenómenos. No obstante, la calidad de información que proporciona un LLS depende de su capacidad para detectar y registrar eventos (flashes) en un área determinada, característica conocida como eficiencia de detección (ED). Este artículo describe la implementación de un software desarrollado en Python® para la estimación de la ED de un LLS y su representación geoespacial usando mapas. Adicionalmente, con información de una red instalada en Colombia, se muestran las ventajas de la herramienta, incluyendo la gestión y análisis de grandes paquetes de datos, la disminución del tiempo de procesamiento y la reducción de la carga computacional para ejecutar diversas tareas (consulta, filtrado, cálculos y análisis estadístico).

Palabras Clave: Análisis estadístico, Eficiencia de detección, Procesamiento de datos, Python, Sistemas de localización de rayos.

Abstract

Lightning Location Systems (LLS) are advanced measurement networks designed to detect and locate atmospheric electrical discharges. These systems are crucial for preventing and mitigating damage caused by these phenomena. However, the quality of information provided by an LLS depends on its ability to detect and record events (flashes) in each area, a characteristic known as detection efficiency (ED). This paper describes the implementation of a software developed in Python® for estimating the DE of an LLS and its geospatial representation using maps. In addition, using information from a network installed in Colombia, the advantages of the tool are shown, including the management and analysis of large data packages, the reduction of processing time, and the reduction of the computational load to execute several tasks (query, filtering, calculations, and statistical analysis).

Keywords: *Data processing, Detection efficiency, Lightning location systems, Python, Statistical analysis.*

1. Introducción

Entre los eventos naturales relacionados con el clima que pueden representar un riesgo considerable para la vida de las personas y animales, se encuentran los rayos [Aranguren, 2011]. Los daños causados por estos eventos atmosféricos pueden incluir incendios forestales, explosiones, lesiones graves e incluso la muerte. Adicionalmente, pueden ocasionar daños en instalaciones y estructuras, interferencia en sistemas de comunicaciones y de transporte, fallas en equipos electrónicos sensibles, interrupciones en la red eléctrica y pérdidas económicas a causa de ello [Ely, 2005]. Estas últimas a su vez afectan negativamente la producción de sectores industriales y/o agrícolas [Theethayi, 2005].

Por estas razones, el estudio de los rayos y su comportamiento ha sido objeto de numerosas investigaciones, con especial atención en el desarrollo y mejora de sistemas de detección y localización de rayos (LLS). Estos proporcionan información en tiempo real de la actividad eléctrica atmosférica y han ampliado la

comprensión del fenómeno para ingenieros, meteorólogos e investigadores alrededor del mundo.

Una de las características técnicas más importantes de un LLS es la eficiencia de detección (ED), la cual se relaciona con la capacidad del sistema para detectar y registrar descargas eléctricas atmosféricas (nube-tierra) en una determinada área. Dichos eventos pueden ser *flashes* que son descargas completas compuestas por: descargas preliminares, líderes, y una o más descargas de retorno o *return strokes*. Estos últimos son eventos asociados exclusivamente a las descargas individuales de alta corriente que impactan la tierra [Uman, 2001].

La eficiencia de detección se suele medir como el porcentaje de rayos que el sistema detecta en comparación con el número total que efectivamente ocurren [Diendorfer, 2009]. Entre los factores que afectan la ED se encuentran: la tecnología y cobertura de los sensores, las condiciones geográficas del área bajo estudio y las condiciones meteorológicas (temporada de lluvias, sequía, nieve, etc.). Por ello, todo LLS requiere estimar este parámetro técnico para analizar su rendimiento y procurar su mejora continua.

Por otra parte, dependiendo de la red de medición, su cobertura y capacidad, los datos asociados a cada evento detectado se registran en intervalos muy cortos, acumulando así una gran cantidad de información. Dentro de esta información se pueden mencionar: fecha y hora del evento, ubicación en coordenadas, tipo de descarga (nube-tierra o intranube), corriente pico, duración, número de descargas de retorno (strokes), entre otros.

Aunque dicha información es valiosa, su manipulación, procesamiento y análisis representan un reto importante. Por lo tanto, se requieren sistemas de procesamiento escalables y soluciones que integren archivos de diversos formatos y estructura, que garanticen tiempos razonables para la obtención de resultados y permitan identificar tendencias y patrones en la dinámica de la actividad de rayos.

Bajo este contexto, la disponibilidad de herramientas gratuitas o de código abierto dedicadas a analizar la actividad de rayos presenta limitaciones en cuanto al alcance y suficiencia con la que se manipulan los datos. Esto se debe en buena medida a la falta de funciones avanzadas para el tratamiento de la información, el

análisis estadístico, la disponibilidad de opciones de configuración y la exportación de datos. Entre tanto, los softwares comerciales enfocados en el estudio de rayos ofrecen mayor funcionalidad, soporte técnico y confiabilidad, pero suelen pertenecer a organizaciones que condicionan el acceso y uso a través de suscripciones o el pago del servicio. Sumado a lo anterior, la falta de uniformidad entre herramientas afecta la interoperabilidad entre LLS, dificultando el análisis global de la actividad de rayos.

Con el propósito de aportar en la solución de estos desafíos, este artículo presenta la herramienta computacional para el tratamiento y procesamiento de información de LLS (ED4LLS), compuesta por un módulo básico, orientado al análisis y filtrado de datos, y un segundo módulo, más especializado, desarrollado para la generación de mapas. Esta herramienta fue desarrollada en Python debido a su versatilidad para procesar grandes volúmenes de datos y sus prestaciones como software libre, ofreciendo así una alternativa gratuita y sin necesidad de credenciales, ni licencias. Adicionalmente, permite realizar el procesamiento y la generación de mapas dentro del mismo entorno de trabajo, simplificando el flujo de tareas y la dependencia de otras herramientas. Por último, la automatización de tareas repetitivas reduce considerablemente el tiempo de producción.

2. Métodos

El desarrollo e implementación de la herramienta computacional ED4LLS surge de la necesidad de optimizar la gestión y análisis de los datos proporcionados por un LLS, así como de evaluar su desempeño a través de la estimación de la ED, al ser un parámetro crucial para generar confianza en la información registrada por este tipo de redes. La secuencia de actividades realizadas para la creación de la herramienta se muestra en la Figura 1. En primer lugar, se llevó a cabo una revisión bibliográfica enfocada en comprender conceptos relacionados con la estimación de la ED, la metodología y normatividad aplicable a los LLS. A esto se sumó un análisis sobre las implicaciones de manipular grandes cantidades de datos (decenas de millones de eventos por año). En la segunda etapa, se revisaron estudios previos como los presentados por [Aranguren, 2013], [Naccarato, 2009] y [Diendorfer,

2009], que han aplicado métodos para estimar la ED de un LLS. A partir de la información típica que debe proporcionar un LLS (eventos, variables de entrada y atributos), se propuso e implementó una metodología para estimar la ED, basada en el procedimiento CIGRE C4.404, descrito en el documento técnico *"Cloud-to-Ground Lightning Parameters derived from Lightning Location Systems. The Effects of System Performance"* [Diendorfer, 2009]. Este informe, además de exponer las características que debe tener un sistema de localización, expone un proceso estadístico para estimar la ED, cuyas variables de entrada parten de la segmentación de mapas en áreas más pequeñas que facilitan la manipulación y agrupación de datos, y la generación de curvas de probabilidad acumulada que corresponde a dos condiciones definidas como *área de prueba* y *área de referencia*.



Fuente: elaboración propia

Figura 1 Proceso de diseño de la herramienta ED4LLS.

Posteriormente, se definió el alcance, las funcionalidades y tipos de usuario que podrían usar la herramienta. Paralelamente, se realizó una revisión de lenguajes de programación adaptables a los requerimientos mencionados, así como una exploración de herramientas disponibles para el análisis de rayos (Sferic Maps®, Vaisala IRIS Focus Remote Sensing Software®, Indian Geo-Platform ISRO, Blizortung.org, entre otras). Esto con el fin de establecer ventajas, desventajas y limitaciones de los softwares o aplicaciones existentes.

Considerando que los LLS se caracterizan por estimar la ubicación de *flashes* o *strokes* en un área determinada, con alto o bajo cubrimiento de sensores, se tienen siempre a disposición grandes bases de datos. Esta información requiere de software específico para su manipulación y representación gráfica, además de un hardware suficiente para hacer el procesamiento y cálculos necesarios para presentar la información casi en tiempo real. De estas necesidades surgió la idea de trabajar en Python® e interactuar con sistemas de información geográfica (Geographic Information System, GIS).

A partir del uso de Python se crearon procesos para manipular los registros “en bruto” adquiridos por un LLS (adquisición, tratamiento y filtrado), presentar resultados generales a partir de tendencias y estadística, simplificar la información requerida por el procedimiento CIGRE, lograr la implementación de éste para distintas localizaciones (áreas de interés), y finalmente, la construcción de mapas de ED. Adicionalmente, y para facilitar el uso del software, se construyó una interfaz gráfica (Graphical User Interface, GUI) basada en PyQt5, compuesta por dos módulos que permiten al usuario una interacción paso a paso.

Python como base de programación

El lenguaje de programación Python® se ha posicionado en la comunidad académica como uno de los favoritos para abordar múltiples problemáticas. La principal razón de su popularidad radica en su amplia documentación e implementación de librerías de código abierto, desarrolladas por una comunidad bastante activa. Asimismo, se destaca por su simplicidad y sintaxis clara, basada en reglas que lo hacen práctico, legible y explícito.

Este lenguaje cuenta con el respaldo de numerosas librerías, lo que lo convierte en una herramienta extremadamente versátil en el campo de la ciencia de datos. Comparado con las hojas de cálculo, Python® tiene una capacidad superior para manipular grandes volúmenes de datos, facilitando un procesamiento eficiente. Por esta razón, durante el desarrollo de la herramienta ED4LLS, especialmente en lo que refiere a la manipulación e interpretación de datos, se empleó la librería Pandas. Esta librería permite trabajar con grandes cantidades de datos almacenados directamente en la memoria RAM, y soporta la lectura de una amplia gama de formatos, que incluyen hojas de cálculo, archivos CSV, libros de Excel y consultas a bases de datos mediante SQL. No obstante, Pandas no se destaca por la manipulación de datos geoespaciales.

Debido a lo anterior, para la manipulación y creación de sistemas de información geográfica (GIS) se usaron las librerías de código abierto *GeoPandas* y *Shapely*. Esta última se enfoca en el análisis teórico de conjuntos y el modelado de datos espaciales y geométricos. Esta combinación de librerías permitió incorporar en la

herramienta ED4LLS varias alternativas de configuración, manipulación y creación de mapas. En resumen, le dieron la capacidad de cargar, manipular y filtrar información registrada por un LLS, y con ello, caracterizar la actividad de rayos a partir de atributos espaciales.

Parámetros de entrada

Aunque cada LLS registra la información de manera distinta, ED4LLS fue diseñada como una alternativa de código abierto para usuarios que necesitan manipular datos provenientes de este tipo de redes (específicamente *flashes*), permitiéndoles obtener la ED según sus propios criterios de evaluación. En primera medida, los registros tipo *flash*, de ahora en adelante denominados "flashes", se deben ingresar en archivos CSV (valores separados por comas). La información debe estar codificada en formato UTF-8, y el carácter de separación de los datos debe ser la coma “,”, sin espacios, ni tabulaciones adicionales entre ellos.

Tabla 1 Información mínima por evento (*flash*).

Contenido	Columna en CSV	Formato	Descripción
Fecha y hora	FechaHora	AAAA-MM-DD HH: mm: ss	Año-mes-día hora: minuto: segundo
Latitud	Latitud	Numero decimal	Coordenada en el eje y
Longitud	Longitud	Número decimal	Coordenada en el eje x
Tipo de descarga	TypeFlash	Número binario	Valor de 0 para descargas nube-tierra y de 1 para descargas intranube
Magnitud de la corriente	PeakCurrent	Numero decimal	Valor en amperios [A]. Su polaridad se interpreta así: $I > 0$: Positiva, $I < 0$: Negativa

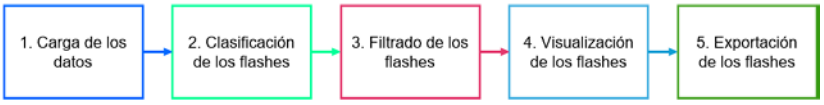
Fuente: elaboración propia

Cada archivo CSV debe contener como mínimo la información presentada en la Tabla 1, incluyendo las características de ocurrencia (fecha, hora, coordenadas) y las características físicas del fenómeno (tipo de descarga y magnitud de corriente). La ubicación de los flashes (latitud y longitud) debe estar en el sistema de coordenadas WGS84, con columnas independientes para cada componente de la coordenada. A continuación, se describen los módulos que integran la herramienta y su relación con la metodología propuesta para estimar la ED, la cual se basa en el procedimiento CIGRE referido anteriormente.

Módulo 1: importación y filtrado de la información

Este módulo es el encargado de recibir los eventos registrados por la red (*flashes* detectados). Como se muestra en la Figura 2, se establecieron varias actividades para asegurar que el procesamiento no consumiera recursos excesivos del hardware. El procedimiento inicia con la carga y organización de los datos en formato CSV. De manera paralela, la información se clasifica en intervalos específicos (días y meses), teniendo en cuenta parámetros como la polaridad, el tipo de flash y la magnitud de corriente. Esta clasificación facilita el manejo y posterior análisis de los datos.

Por otra parte, el proceso de filtrado permite discriminar la información empleando uno o más criterios establecidos por el usuario, tales como: rango de fecha, tipo de descarga, polaridad del flash y magnitud de corriente. De esta manera, los filtros se aplican para refinar los datos de interés según los criterios de entrada mencionados. Posteriormente, la información se representa mediante diagramas de barras y de tortas, lo que permite visualizar las proporciones de los datos ya filtrados. Asimismo, se realizan inspecciones por temporadas y análisis de frecuencia con la ayuda de diagramas de barras e histogramas, facilitando el análisis intuitivo y comprensible de la información suministrada por el LLS. Finalmente, a partir de los filtros seleccionados, la información de los flashes se exporta para su posterior análisis y la generación de mapas e informes según las necesidades del usuario. En este proceso, se garantiza que los datos estén disponibles en un formato accesible y más organizado. El algoritmo que se ejecuta en esta etapa se observa en Figura 3.



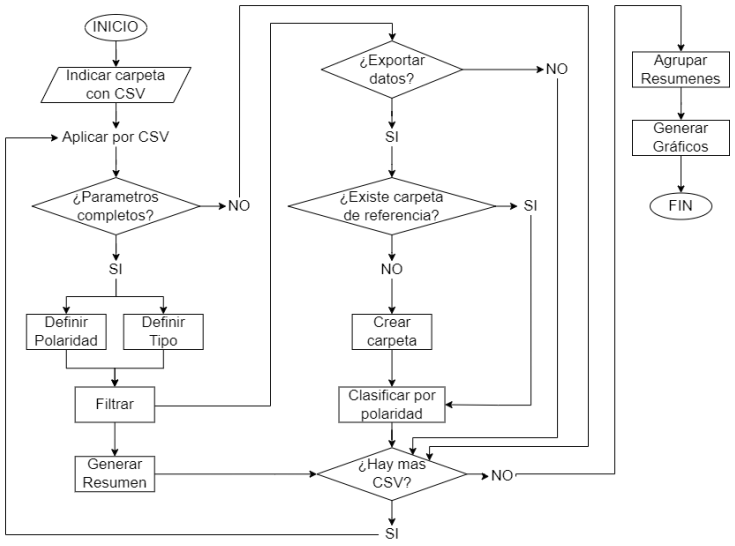
Fuente: elaboración propia

Figura 2 Estructura del módulo 1 de la herramienta ED4LLS.

Modulo 2: metodología para estimar la ED

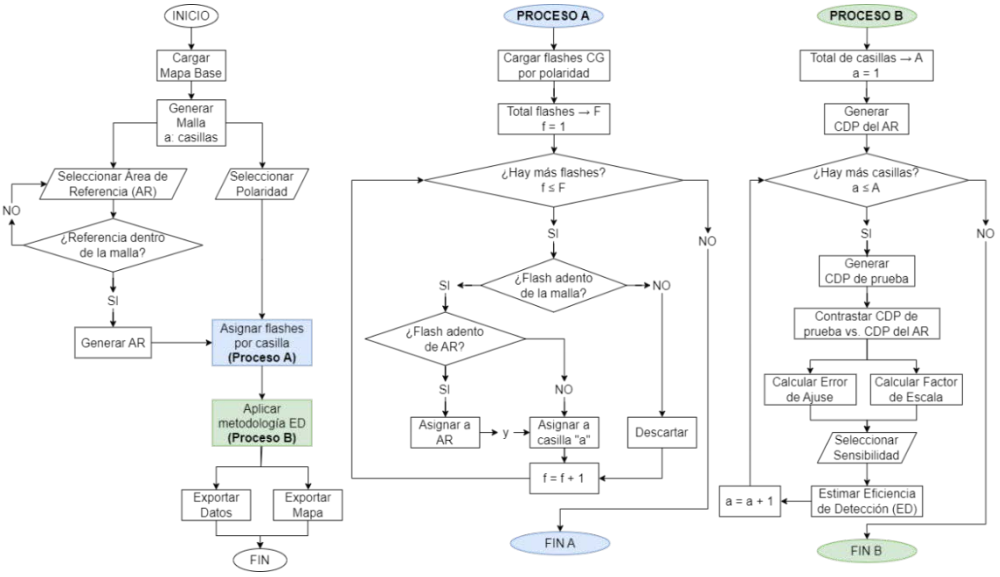
El segundo módulo se enfoca en el cálculo de la ED y permite transformar los datos procesados (clasificados, filtrados y organizados) en mapas, facilitando la visualización y análisis de la actividad de rayos bajo un contexto geográfico.

Revisando la secuencia de actividades mostrada en la Figura 4, el uso del módulo inicia con la importación (carga) de un mapa base. En esta etapa, la herramienta pone a disposición (por defecto) un mapa de Colombia dividido por departamentos el cual fue tomado del geo-portal del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). Este mapa proporciona la referencia geográfica para definir las zonas donde se estimará la ED del LLS.



Fuente: elaboración propia

Figura 3 Descripción del proceso de carga y filtrado.



Fuente: elaboración propia

Figura 4 Diagrama del proceso de carga y filtrado de la herramienta.

Una vez cargado el mapa base, la herramienta genera una malla compuesta por cuadrículas de igual tamaño, que se utilizan para agrupar los registros de flashes (generalmente nube-tierra) por zonas y luego generar curvas de distribución de probabilidad (CDP) acumulada de los eventos. El siguiente paso selecciona el área de referencia, la cual puede ser una casilla, un conjunto de ellas o toda la malla que cubre el mapa, generando la CDP de referencia (curva de referencia).

A partir del área de referencia seleccionada y de las curvas de probabilidad obtenidas de todo el enmallado, la herramienta estima la ED para cada casilla individual del mapa. Este proceso, descrito con detalle en [Diendorfer, 2009], se complementa con la generación de mapas que representan la ED estimada de las cuadrículas. Para mejorar la presentación, se utiliza generalmente una paleta de colores o mapas de calor que resaltan los niveles o rangos de eficiencia. Finalmente, los mapas pueden exportarse en hojas de cálculo o en formato **. Shape*, lo que permite su uso con otros softwares de información geográfica. Esto brinda al usuario la posibilidad de realizar estudios o análisis adicionales utilizando herramientas con mayores prestaciones.

Interfaz gráfica de usuario

Luego de ejecutar el programa, el usuario tendrá a disposición una ventana de bienvenida con dos botones que permiten accesar a los módulos descritos en la sección anterior. En la Figura 5 se puede apreciar dicha ventana donde también se encuentra el manual de usuario y la información de los desarrolladores.

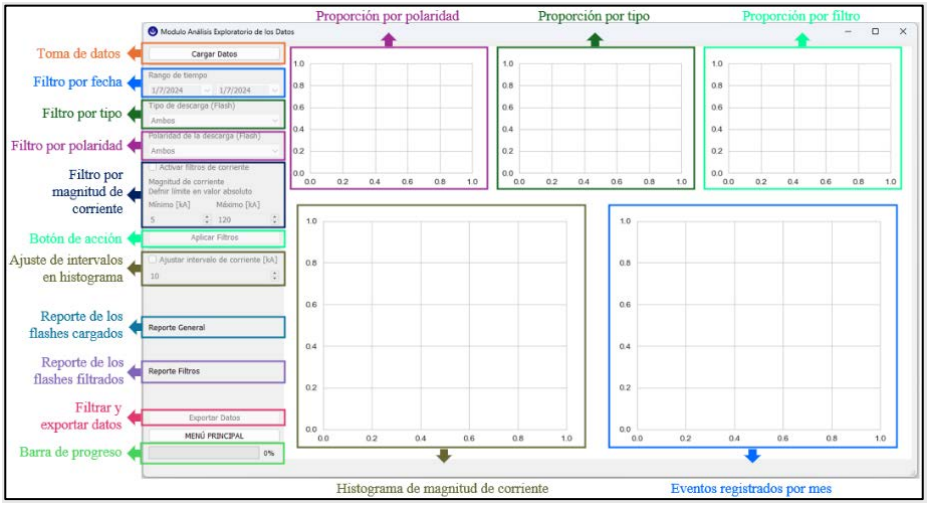
Al iniciar el primer módulo, el usuario tendrá a su disposición una serie de opciones para importar, clasificar, filtrar y visualizar los eventos (flashes) disponibles. En la Figura 6 se muestra la estructura de la interfaz, que incluye varias opciones de configuración ubicadas en la sección del lado izquierdo. En este punto, un botón de carga permite al usuario seleccionar la carpeta donde se encuentra la información del LLS (generalmente archivos CSV), y una barra de progreso que muestra el estado de la carga de datos, indicando el avance del proceso. Posteriormente, un conjunto de menús desplegables y campos de entrada permite seleccionar los filtros por fecha, tipo de flash (nube-tierra o intranube), polaridad y magnitud de corriente.

Una vez aplicados estos filtros, en el lado derecho de la interfaz se muestran gráficas con los resultados del procesamiento (diagramas de torta, de barras e histogramas). De esta forma, el usuario puede decidir qué información desea exportar para estimar la ED y seleccionar el mapa complementario que desea generar (actividad de rayos o DDT).



Fuente: elaboración propia

Figura 5 Ventana de inicio de la herramienta ED4LLS.

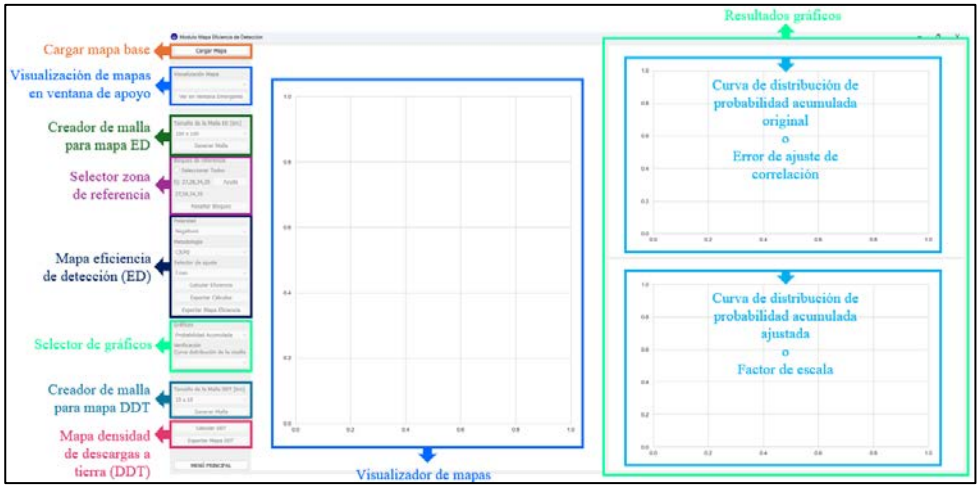


Fuente: elaboración propia

Figura 6 Módulo de exploración y análisis de los datos.

Finalmente, el software exporta los datos filtrados y clasificados por polaridad en carpetas específicas. Esto serán los insumos para tratar los registros y usar el

módulo 2. La Figura 7 muestra la interfaz de usuario del segundo módulo, que incluye funciones de configuración en el lado izquierdo y un espacio para la visualización de resultados en el centro y a la derecha. Inicialmente, mediante el botón ubicado en la parte superior, el usuario puede cargar el mapa base, el cual se presentará en la ventana de visualización (sección central de la interfaz). Todos los mapas se mostrarán en esta área, permitiendo al usuario revisar los resultados y avances del proceso.



Fuente: elaboración propia

Figura 7 Módulo para la estimación de la ED y la generación de mapas.

En la parte inferior izquierda se dispone de varias opciones para definir el tamaño de las cuadrículas y generar la malla requerida para estimar la ED. Sumado a lo anterior, un conjunto de desplegables permitirá definir los parámetros necesarios para aplicar la metodología, entre estos están: la polaridad de los flashes, la ecuación de los factores de escala (basada en la raíz del error cuadrático medio) y la sensibilidad. Esta última incluye tres criterios para determinar el valor apropiado de cada factor de escala que representa a su vez la ED. Dichos criterios son: ajuste al menor valor de corriente, ajuste a diez kiloamperios (kA) o ajuste al menor error de ajuste. La sección gráfica, dispuesta a la derecha de la interfaz, permite verificar las CDP obtenidas para cada zona o cuadrícula, y contrastarlas con la curva de referencia. También permite revisar el comportamiento del factor de escala y el error de ajuste asociado con el coeficiente de correlación lineal entre las curvas

comparadas (referencia vs. casilla). Finalmente, los botones dispuestos en la parte inferior permiten exportar los resultados finales. El primero de estos, exporta los datos en una hoja de cálculo que incluye los vectores de las CDP originales y ajustadas (después de aplicar el método CIGRE), junto a los factores de escala y los errores de ajuste. El segundo botón, exporta el mapa de ED en formato *Shapefile* (SHP) que podrá ser procesado con un software GIS.

3. Resultados

Para validar el desempeño de la herramienta ED4LLS, durante este trabajo se empleó una base de datos suministrada por la *Earth Networks Total Lightning Network* (ENTLN), gracias al acuerdo de cooperación académica establecido entre el grupo de investigación GISE3-UD y la empresa Canal Clima® que ofrece servicios de monitoreo de amenazas naturales en tiempo real y es la administradora del LLS instalado en Colombia.

Earth Networks® es pionera en la detección y clasificación de rayos y cuenta con más de 1800 sensores desplegados en más de 100 países (actualización a 2012). Su red emplea la técnica de tiempo de arribo (TOA), que junto con tecnología GPS y algoritmos sofisticados, permite localizar y clasificar rayos. Adicionalmente, emplea sensores de banda ancha (desde $1\,Hz$ hasta $12\,MHz$), detectando descargas intranube y nube-tierra [Rudlosky, 2014]. Durante este proceso, para cada evento se registran las formas de onda captadas por los sensores y se envían a un servidor central para calcular tiempos de llegada mediante algoritmos de correlación.

En la última década, la ENTLN se ha enfocado en mejorar su ED, aumentando el número de estaciones (nodos) instaladas, optimizando modelos y desarrollando algoritmos más precisos. Esto ha permitido que la red alcance eficiencias por encima del 85% en América, Europa y Australia, y entre $70\% \sim 88\%$ en Sudáfrica y Asia del Sur, siendo el norte de África y Asia Central los territorios con más bajas eficiencias (entre $10\% \sim 63\%$) [Bui, 2015].

En la etapa inicial de validación se realizó una comparación con algunos métodos tradicionales utilizados en el procesamiento de datos. Para esto, se usó una base

de datos de treinta millones de flashes (54% intranube y 46% nube-tierra) registrados durante 2021 por 18 estaciones instaladas en Colombia. Dado el tamaño de la base de datos, se realizaron pruebas sobre la cantidad de archivos, organizándolos primero en meses y posteriormente en días, observando que la manipulación y tratamiento de datos fue 15% más rápida al usar archivos diarios.

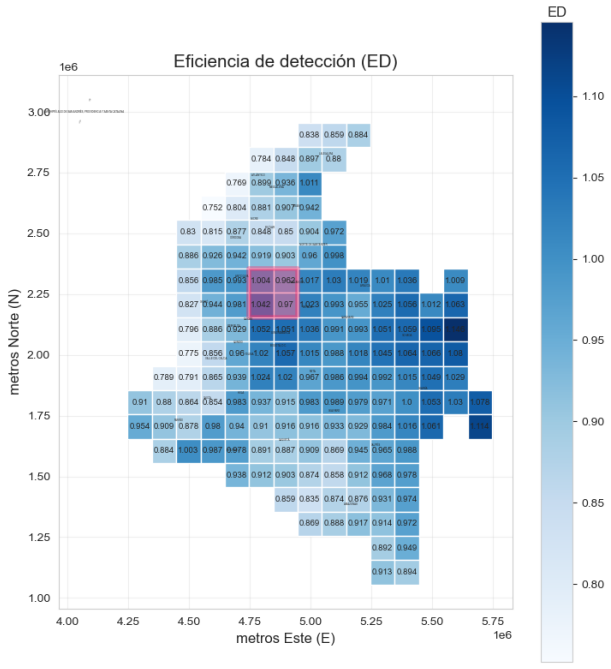
La primera actividad de procesamiento se realizó con Excel®. No obstante, la posibilidad de programar macros no fue eficiente, debido al tiempo requerido para ejecutar tareas iterativas. Además, este programa posee capacidades limitadas para el manejo de información geográfica. La siguiente opción fue ArcGIS®, una herramienta potente para el procesamiento de información geográfica. Aunque este software permite la carga de múltiples capas de datos, demandaba un alto esfuerzo computacional. Asimismo, la construcción de mallas y la asignación de flashes a cada cuadricula requerían de la ejecución de múltiples tareas y el uso complementario de herramientas en línea, sin dejar de lado que no facilitaba la generación de curvas de distribución de probabilidad en el mismo entorno.

Finalmente, como ya se mencionó al inicio de esta sección, Python® se presentó como una alternativa eficiente para realizar todo el proceso bajo un mismo entorno (desde la importación hasta la generación de mapas). Adicionalmente, el uso de bibliotecas como *Pandas*, *GeoPandas*, *Matplotlib*, *PyQt5* fue fundamental para el procesamiento y visualización de los datos. De esta manera, la herramienta construida permite cargar, clasificar, filtrar y visualizar datos de manera integrada.

A partir de lo expuesto, la Figura 8 muestra el mapa de ED obtenido al ejecutar el módulo 2 de la ED4LLS. Este mapa fue construido sobre el territorio continental de Colombia usando una malla con cuadrículas de cien por cien kilómetros ($100\ x\ 100\ km$). La zona de referencia seleccionada se compuso de las cuadriculas en rojo (región del Magdalena medio) y se empleó la información de flashes nube-tierra de polaridad negativa con corrientes pico entre $5\ kA$ y $120\ kA$.

Los valores de ED mostrados en el mapa varían entre cero (eficiencia nula) y uno (mayor eficiencia), con algunas casillas por encima del valor ideal. Estas últimas son interpretadas como zonas en las que se reportó una cantidad de eventos superior a la real. Esta condición puede deberse a la sensibilidad de la instrumentación,

provocando que algunos sensores interpreten señales de ruido o interferencias electromagnéticas como rayos, registrando un evento falso. Las zonas de mayor eficiencia de detección para la ENTLN se localizan en el norte y centro del país (entre 90% y 100%), siendo mayores a lo observado en la zona sur, la zona occidental y el pacífico colombiano (~84%).



Fuente: elaboración propia

Figura 8 Mapa de ED de la ENTLN® para Colombia usando la ED4LLS.

Por su parte, la Tabla 2 sintetiza el recurso requerido para alcanzar resultados adecuados. En este caso, usando una muestra del 10% del total de la información disponible, se aprecia que el tiempo invertido desde la carga inicial de datos hasta la creación del mapa de ED exhibe una diferencia significativa entre usar la ED4LLS y el proceso manual combinado entre Excel® y ArcGIS®.

Durante el proceso manual, la carga y el filtrado de datos se realizan de forma iterativa debido a las limitaciones de Excel® (un millón de filas por hoja), aumentando casi seis veces el tiempo empleado, sin olvidar que dicho proceso se debe repetir por cada millón de datos. Entre tanto, debido a las configuraciones y ajustes requeridos, la carga y clasificación de datos en ArcGIS® toma hasta 10 veces lo

empleado por la ED4LLS. Adicionalmente, esta alternativa implica exportar y procesar nuevamente la información en Excel® para generar las CDP, y luego calcular los factores de escala y los errores de ajuste para cada área requeridos para estimar la ED de la LLS.

Por otro lado, el tiempo requerido para definir el área de referencia y generar el mapa de ED aumenta casi 100 veces con el método combinado Excel®-ArcGIS®. Lo anterior, incluye un aumento significativo en el consumo de recursos de hardware (memoria RAM y procesador). En contraste, la ED4LLS automatiza estos pasos, permitiendo al usuario generar estadísticas y mapas de ED. Es importante mencionar que los tiempos invertidos con el método manual son relativos, y pueden ir en aumento, ya que dependen de la experiencia y el conocimiento que el usuario tenga de los programas referidos.

Tabla 1 Tiempo de ejecución empleado para una muestra de 10% de flashes.

Proceso	**Tiempo empleado por la ED4LLS [s]**	**Tiempo aproximado Proceso manual [s]**
Carga de los datos	19	150
Clasificación	10	60
Filtrado	12	20
Exportación	12	10
Carga Mapa Base	7	7
Creación de malla	11	8
Selección de área de referencia	5	60
Generación de mapa de ED	13	1800
Total (incluyendo parametrización)	**92**	**2600**

Fuente: elaboración propia

4. Discusión

Debido a la escasez de estudios que abordan en detalle el proceso para estimar la ED de un LLS, y considerando las investigaciones previas que han aplicado métodos similares, la herramienta ED4LLS surge como una alternativa, para obtener en corto tiempo resultados que describen el desempeño de cualquier red y permiten estudiar la actividad de rayos de un país o una región específica. Al ser un software de acceso libre, esta herramienta ofrece a la comunidad especializada y a los administradores de un LLS, estimar la ED de una red sin restricciones o sesgos en el procesamiento de la información y plantear mejoras técnicas para la red (aumento de sensores, cambios en la ubicación de los nodos, entre otros).

La facilidad que ofrece para la generación de mapas, aplicando diversos criterios y configuraciones, hace que ED4LLS tenga ventajas con respecto a otras aplicaciones o métodos, especialmente en lo que se refiere a la manipulación de datos en conjunto con la integración de SIG. Esto facilita la inclusión de diferentes criterios de análisis y permite decidir la manera en que se muestra la información disponible. Lo anterior es importante ya que cada LLS cuenta con sus propios criterios para estimar la eficiencia de detección.

Adicionalmente, la herramienta permite ajustar la sensibilidad del método según los datos ingresados, alineándose con la metodología basada en el ajuste de curvas de probabilidad (CDP). Esto es relevante, ya que pocos estudios detallan los criterios empleados para ajustar las curvas de distribución, limitándose en su mayoría a presentar los mapas de manera directa, sin explicar el proceso subyacente.

En este contexto, el trabajo presentado por Aranguren [Aranguren, 2013], si bien muestra un mapa de ED para el territorio colombiano, no profundiza en la metodología usada, lo que dificulta la interpretación de las curvas de distribución, tanto de las casillas, como del área de referencia. Por otra parte, Naccarato en 2012 presenta un modelo similar al propuesto por CIGRE, ajustando una curva de prueba a una de referencia. No obstante, los resultados muestran que hay flexibilidad en el ajuste, reportando una ED cercana al 70% y concluyendo que la estimación de este parámetro depende directamente de la magnitud de la corriente de las descargas. Estas experiencias plantean aspectos por mejorar en la divulgación y promoción de estos y otros métodos alternativos [Naccarato, 2012].

5. Conclusiones

Las pruebas realizadas durante el desarrollo y validación de la herramienta ED4LLS, incluyendo el caso de estudio presentado en este artículo, demuestran que es una alternativa eficiente para el procesamiento de los datos provenientes de un sistema de localización de rayos (LLS). En comparación con métodos tradicionales, como Excel® y ArcGIS®, la herramienta reduce considerablemente el tiempo requerido para estimar la eficiencia de detección (ED), así como para la generación de mapas. Asimismo, la ED4LLS se destaca por su versatilidad, ya que

permite ejecutar múltiples tareas en un solo entorno, donde el usuario puede ajustar los parámetros de entrada y generar estadísticas, obteniendo datos que pueden manipularse en el módulo avanzado o con el apoyo de otras herramientas de análisis geoespacial.

Entre tanto, el diseño pedagógico y su interfaz intuitiva hacen que la herramienta sea accesible tanto para estudiantes como para profesionales e investigadores, facilitando el manejo y procesamiento de datos, lo que permite enfocarse en el análisis de los resultados. Entre tanto, la generación de mapas contribuye al estudio de la actividad de rayos, ayudando a identificar patrones que influyen en la detección y gestión del riesgo asociado a estos fenómenos naturales.

Finalmente, durante el desarrollo de la herramienta se optimizaron diversos procesos involucrados con la estimación de la ED, con el fin de que los resultados fuesen confiables. Para el caso bajo estudio, se reportó que la ENTLN® presento una eficiencia entre 90 y 100% en el centro y norte de Colombia, así como un promedio del 84% para el resto del país.

6. Bibliografía y Referencias

[1] Aranguren, D. Desempeño de Sensores de Campo Electrostático en Sistemas de Alerta de Tormentas, pp. 3–13, Bogotá, Colombia. 2011.

[2] Aranguren, D., Inampués, J., López, J., Tibaduiza, A., Casas, F., Torres, H., B., H. Colombian Total Lightning Detection Network and early detection of failure risks for power systems. Simposio Internacional sobre Calidad de la Energía Eléctrica (SICEL), pp. 1–2, Medellín, Colombia. Agosto, 2013.

[3] Bui, V., Chang, L. C., Heckman, S. A performance study of earth networks total lighting network (ENTLN) and worldwide lightning location network (WWLLN). International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI), pp. 386–391, Las Vegas, NV, USA. Diciembre, 2015.

[4] Diendorfer, G., Schulz, W., Cummins, C. Cloud-to-Ground Lightning Parameters derived from Lightning Location Systems. The Effects of System Performance. CIGRE Ref. 376. Abril, 2009.

[5] Ely, J. Electromagnetic Interference to Flight Navigation and Communication Systems: New Strategies in the Age of Wireless, pp. 1-3, Reston, Virigina, EE.UU. Septiembre, 2005.

[6] Naccarato, K. P., Pinto, O. Improvements in the detection efficiency model for the Brazilian lightning detection network (BrasilDAT). Atmospheric Research, 91(2–4), pp. 546–563. Julio, 2009.

[7] Naccarato, K. P., Pinto, O. Lightning detection in Southeastern Brazil from the new Brazilian Total Lightning Network (BrasilDAT). International Conference on Lightning Protection (ICLP). IEEE, pp. 1–9. Septiembre 2012.

[8] Rudlosky, S. Evaluating Ground-Based Lightning Detection Networks using TRMM/LIS Observations. 23rd International Lightning Detection Conference, pp. 1–2. Marzo 2014.

[9] Theethayi, N. Electromagnetic Interference in Distributed Outdoor Electrical Systems, with an Emphasis on Lightning Interaction with Electrified Railway Network. Uppsala University, Disciplinary Domain of Science and Technology. Octubre, 2005.

[10] Uman, M. The Lightning Discharge, pp. 65-95, Florida, EE.UU. Enero, 2001.