

Aplicativo web para la visualización de la ocurrencia de descargas eléctricas atmosféricas: lightspot

Web application for lightning occurrence visualization: lightspot

Fernando A. Díaz-Ortiz¹   Johan Romero-Romero²  Karen Yepes-Chala²  Pedro L. Cifuentes-Guerrero¹ 

¹Programa de Ingeniería Electrónica, Universidad de Cundinamarca, Fusagasugá, Colombia.

²Programa de Ingeniería de Sistemas y Computación, Universidad de Cundinamarca, Fusagasugá, Colombia.

Resumen

Introducción: este artículo presenta el desarrollo de una aplicación web diseñada para visualizar datos relacionados con la ocurrencia de rayos, utilizando la información suministrada por la red de localización de rayos World Wide Lightning Location Network (WWLLN)..

Objetivo: el objetivo de este estudio es desarrollar una herramienta que permita la visualización de datos sobre rayos, facilitando su análisis mediante el uso de metodologías ágiles como programación extrema y Scrum..

Metodología: la metodología de desarrollo de la aplicación incluye el uso de programación extrema y Scrum, abarcando la arquitectura de software, el diseño de interfaces y la ejecución de pruebas funcionales e integración para garantizar el rendimiento y la funcionalidad del sistema.

Resultados: La validación de la aplicación se realizó con datos de rayos del departamento de Cundinamarca, Colombia, mostrando una intensa actividad eléctrica en la provincia del Bajo Magdalena, especialmente en los municipios de Yacopí y Caparrapí. Se observó un pico de actividad eléctrica alrededor de las 9:00 p.m. hora local. Los resultados obtenidos coinciden con los hallazgos de estudios previos realizados en áreas más amplias, lo que valida la efectividad de la aplicación.

Conclusiones: la aplicación web demostrada en este artículo facilita el procesamiento y análisis de grandes volúmenes de datos relacionados con la actividad de rayos, confirmando su utilidad para estudios en diversas regiones y contribuyendo al monitoreo de fenómenos eléctricos.

Palabras clave: rayos, WWLLN, programación extrema, scrum, aplicación web

Abstract

Introduction: this article presents the development of a web application designed to visualize data related to lightning occurrences, using information provided by the lightning location network World Wide Lightning Location Network (WWLLN)..

Objective: the aim of this study is to develop a tool that enables the visualization of lightning data, facilitating its analysis through the use of agile methodologies such as extreme programming and Scrum..

Methodology: the development methodology of the application includes the use of extreme programming and Scrum, covering software architecture, interface design, and the execution of functional and integration testing to ensure system performance and functionality.

Results: the application was validated using lightning data from the department of Cundinamarca, Colombia, showing intense electrical activity in the Bajo Magdalena region, particularly in the municipalities of Yacopí and Caparrapí. A peak in activity was observed around 9:00 p.m. local time. The obtained results align with findings from previous studies conducted in broader areas, validating the effectiveness of the application.

Conclusions: the web application demonstrated in this article facilitates the processing and analysis of large volumes of lightning data, confirming its usefulness for studies in different regions and contributing to the monitoring of electrical phenomena.

Keywords: lightning, WWLLN, extreme programming, scrum, web application.

¿Cómo citar?

Díaz-Ortiz, F.A., Romero-Romero, J., Yepes-Chala, K., Cifuentes-Guerrero, P.L. Aplicativo web para la visualización de la ocurrencia de descargas eléctricas atmosféricas: lightspot. Ingeniería y Competitividad, 2025, 27(1) e-20514326

<https://doi.org/10.25100/iyc.v27i1.14326>

Recibido: 9-07-24

Evaluado: 30-09-24

Aceptado: 9-12-24

Online: 10-02-25

Correspondencia

faugustodiaz@ucundinamarca.edu.co



Contribución a la literatura

¿Por qué se realizó?

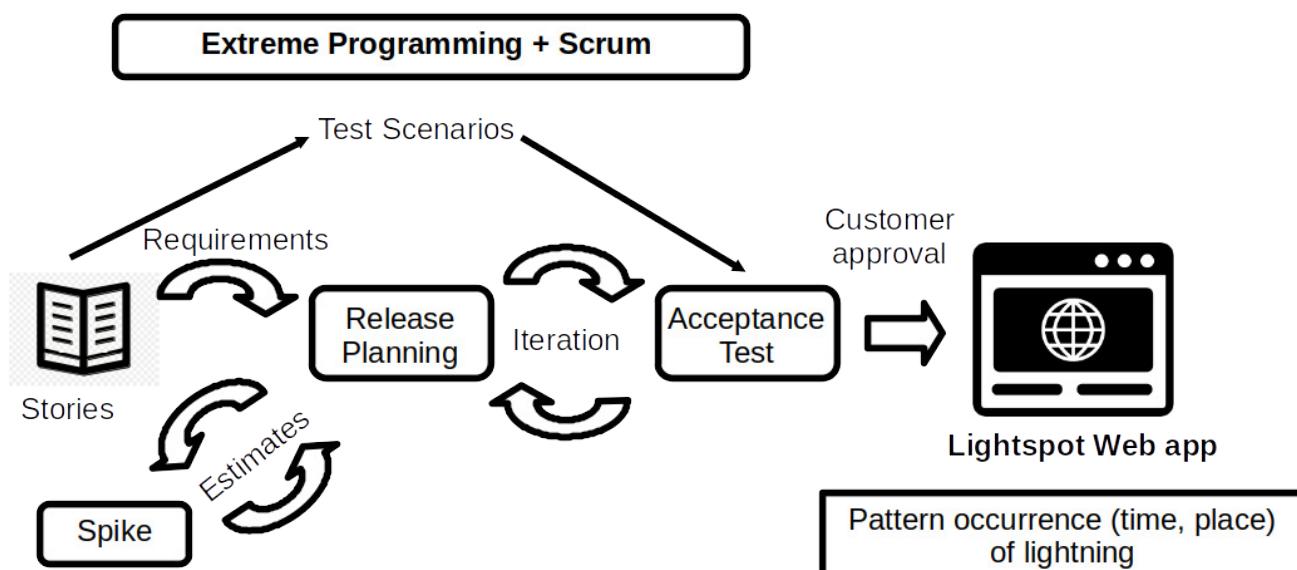
La aplicación web se desarrolló como una herramienta para procesar datos sobre rayos e identificar patrones de ocurrencia. Esta capacidad permite a los usuarios determinar cuándo y dónde ocurrieron los eventos de rayos, lo que facilita una mejor comprensión y planificación para mitigar los riesgos relacionados con los rayos.

¿Cuáles fueron los resultados más relevantes?

Los dos resultados principales de este proyecto fueron, en primer lugar, el desarrollo de la aplicación web guiado por los principios combinados de programación extrema y metodologías Scrum, lo que garantiza un proceso de desarrollo ágil e iterativo. El segundo resultado significativo fue la validación de la herramienta utilizando datos reales sobre rayos, lo que proporcionó información sobre los patrones de actividad de rayos en el departamento de Cundinamarca.

¿Qué resultados aportan estos resultados?

El primer resultado demuestra a los nuevos investigadores cómo desarrollar herramientas para procesar datos sobre rayos, ofreciendo un marco y una guía práctica para proyectos similares. El segundo resultado destaca el potencial del filtrado de datos sobre rayos para identificar patrones de ocurrencia, lo cual puede desempeñar un papel crucial en la creación de planes eficaces de mitigación y seguridad. Estos resultados contribuyen en conjunto al avance tanto de los enfoques metodológicos como de las aplicaciones prácticas en la gestión del riesgo de rayos.



Introducción

El rayo es un fenómeno natural caracterizado por la transferencia de carga eléctrica, que generalmente se origina en una nube electrificada (Cumulonimbus) (1), (2). Las descargas pueden ocurrir dentro de una sola nube, entre nubes, en el aire circundante o en el suelo. Sin embargo, en condiciones específicas, los rayos también pueden acompañar a las erupciones volcánicas y a las tormentas de fuego (3), (4).

La mayoría de los rayos se producen en la troposfera, y solo alrededor del 25% llega al suelo cuando las descargas de nube llegan a tierra (CG) (5). Estas descargas transfieren corrientes de alta intensidad a la tierra, produciendo destellos visibles y truenos audibles. El rápido calentamiento del aire a lo largo de la trayectoria de descarga ioniza las moléculas de aire, emitiendo fotones y generando ondas de choque.

Las regiones con intensa actividad de rayos se localizan típicamente en zonas intertropicales, donde la topografía, las precipitaciones y los patrones de viento favorecen su producción (6). El norte de América del Sur, clasificada constantemente como una de las regiones con la mayor actividad de rayos, ejemplifica este fenómeno (7). En este caso, los rayos plantean riesgos significativos para la vida humana, los animales y la infraestructura, en particular por las descargas de CG (8).

Un estudio realizado en Colombia entre 1997 y 2014 reportó una tasa anual de mortalidad relacionada con rayos de 1,78 muertes por millón de habitantes, lo que equivale a aproximadamente 80 muertes por año (9). La mayoría de los incidentes ocurrieron en áreas rurales, donde las actividades al aire libre son comunes. Del mismo modo, un análisis de los datos de 1997 a 2014 reveló una tasa de mortalidad de 1,51 por millón anual (10). Ambos estudios ubican a Colombia entre los países latinoamericanos con las tasas de mortalidad más altas por rayos.

Estos hallazgos subrayan la necesidad de estudiar los rayos en Colombia para comprender sus características y desarrollar estrategias efectivas de mitigación (11). El paso inicial es identificar cuándo y dónde se producen los rayos. Dicha información apoya la creación de mapas climatológicos que ilustran la actividad de los rayos, lo que ayuda en el desarrollo de medidas para minimizar el impacto de las descargas de CG en las personas y la infraestructura (12).

La detección del origen de una descarga de CG requiere una red de sensores para monitorear los cambios en los campos eléctricos y magnéticos ambientales. Estas redes suelen incluir estaciones de medición equipadas con antenas de bucle para detectar campos magnéticos en la banda VLF, complementadas con instrumentación adicional para la estimación de la polaridad (13). Los datos de estas estaciones se combinan para estimar los orígenes de descarga utilizando métodos como la radiogoniometría (DF), la hora de llegada (TOA) o la hora de llegada del grupo (TOGA) (14) (15).

Las redes de detección proporcionan datos de ubicación de rayos, incluida la latitud, la longitud y la marca de tiempo estimada de la descarga (16). Algunas redes también estiman la corriente máxima y la polaridad de descarga (positiva o negativa), dependiendo de la instrumentación disponible. Sin embargo, a menudo faltan representaciones gráficas georreferenciadas de la ubicación de los rayos.

Estas visualizaciones mejoran la interpretación de los datos, haciendo que la información sea más accesible para un público más amplio.

A nivel mundial, se estima que cada segundo se producen entre 40 y 50 rayos, lo que equivale a millones de descargas diarias (17). Gestionar y trazar este enorme volumen de datos es todo un reto. Por ejemplo, un conjunto de datos del centro de Colombia contiene más de 80 millones de registros que abarcan cinco años, con un promedio de 16 millones de eventos al año o alrededor de 40.000 descargas diarias. Este estudio obtuvo datos de rayos de los primeros 15 días de octubre de 2022 de la Red Mundial de Localización de Rayos (WWLLN).

Si bien muchos estudios anteriores han identificado patrones de rayos, a menudo carecen de detalles sobre las herramientas utilizadas para el procesamiento de datos y el reconocimiento de patrones (18), (19), (20). Este estudio aborda esta brecha al detallar el desarrollo y la validación de una herramienta para identificar patrones de actividad de rayos. Esta contribución llena un vacío crítico en la investigación existente y proporciona un marco para que estudios futuros publiquen patrones de rayos validados utilizando esta herramienta.

Metodología

La aplicación web Lightspot está diseñada para ser una herramienta accesible tanto para el público en general como para los usuarios registrados, lo que les permite ver datos de ocurrencia de rayos en varias regiones. Su objetivo principal es proporcionar una plataforma en la que los usuarios puedan cargar archivos de texto plano en formato WWLLN que contengan registros de caída de rayos, facilitando así el análisis de los patrones de actividad de los rayos en áreas específicas. Actualmente, la aplicación permite a los usuarios con roles de administrador cargar datos, haciéndolos accesibles para todos los usuarios. Lightspot se encuentra en la etapa de desarrollo funcional y está previsto que se lance en línea en el futuro, ofreciendo un acceso más amplio y el potencial de integrar nuevas aplicaciones en función de las necesidades del usuario.

Los autores desarrollaron una aplicación web llamada Lightspot utilizando una combinación de eXtreme Programming (XP) seleccionada por su énfasis en el desarrollo de software de alta calidad y metodologías Scrum que proporcionan un marco colaborativo para la gestión de tareas. Ambas metodologías enfatizan el trabajo en equipo, la retroalimentación continua y la entrega de software en ciclos de desarrollo cortos.

El proyecto se organizó en cinco entregas iterativas, o sprints, que permitieron un progreso incremental y la entrega de productos funcionales viables mínimos. La Figura 1 ilustra las seis fases de la metodología XP, integrando artefactos del marco Scrum para apoyar el desarrollo iterativo de software y la organización de proyectos.

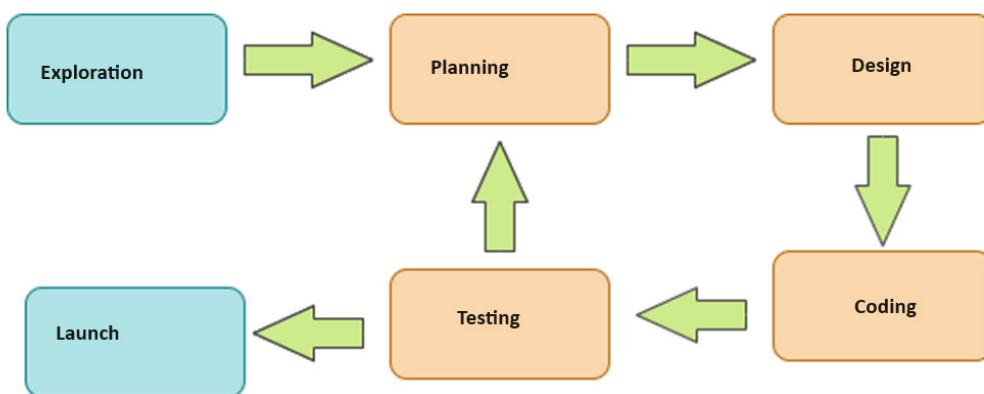


Figura 1. Fases metodológicas para el desarrollo de aplicaciones web

Requisitos

Se definieron los roles de los participantes en el proyecto, incluido el propietario del producto, el equipo de desarrollo y las partes interesadas. Se llevó a cabo una revisión de la literatura para identificar desarrollos de software similares centrados en la visualización de rayos. Las historias de usuario se crearon para guiar al equipo de desarrollo en la selección de tecnologías adecuadas y la exploración de posibles arquitecturas de software. Los requisitos funcionales para la aplicación web se recopilaron siguiendo el estándar IEEE 830, como se resume en la Tabla 1.

Tabla 1. Requisitos funcionales de la aplicación web

Módulo	Bacalao	Requisito
Medición de variables	RF-1	Cargar archivo de texto con registros de ocurrencia de rayos
	RF-2	Eliminar el último registro de relámpagos
	RF-3	Visualización de la ubicación geográfica de los registros de rayos
Visualización de datos	RF-4	Filtrar mapa por ubicación
	RF-5	Filtrar mapa por tiempo
	RF-6	Mostrar estadísticas de registro de relámpagos en gráficos
	RF-7	Filtrar gráficos por tiempo
	RF-8	Filtrar gráficos por ubicación
	RF-9	Generar informes de registros de rayos
Generación de informes	RF-10	Filtrar informes por tiempo
	RF-11	Filtrar informes por ubicación
	RF-12	Autenticar usuario
Gestión de usuarios	RF-13	Registrar usuario
	RF-14	Activar la cuenta de usuario por correo electrónico
	RF-15	Lista de usuarios registrados

La norma ISO/IEC 25010 se utilizó como referencia para los requisitos no funcionales, centrándose en la eficiencia del rendimiento, el uso de recursos, la capacidad de almacenamiento, la usabilidad alineada con las directrices de experiencia del usuario y la mantenibilidad. Tabla 2.

Tabla 2. Requisitos no funcionales de la aplicación web

Característica	Código	Requisito
Eficiencia de rendimiento	RNF-1	Utilización de recursos
	RNF-2	Capacidad
Usabilidad	RNF-3	Operabilidad
	RNF-4	Estética de la interfaz de usuario
Mantenibilidad	RNF-5	Modularidad

Visual Studio Code se utilizó para el desarrollo frontend, mientras que PyCharm se empleó para la construcción backend. El control de versiones se administró a través de un repositorio de GitHub. MongoDB Compass facilitó la gestión de la base de datos, y Postman se utilizó para enviar solicitudes HTTP para validar el comportamiento de la API.

Planificación

En esta fase, el proceso de sprint iterativo comenzó con los casos de usuario priorizados del backlog del producto. Se utilizó una herramienta de tablero Kanban para administrar y visualizar el flujo de trabajo del equipo en tres columnas: trabajo pendiente, trabajo en curso y trabajo completado. El desarrollo de la aplicación web se organizó en cinco sprints basados en la complejidad:

Primer sprint: autenticación de usuario desarrollada, carga de registros desde un archivo de texto y visualización de información en un mapa geográfico.

Segundo sprint: implementación de filtros en el mapa geográfico por ubicación (departamento y municipio) y hora (horas y fechas). Desarrollé una interfaz para eliminar registros cargados usando una lista desplegable.

Tercer sprint: creación de un cuadro de mando con gráficos descriptivos de los registros, permitiendo la síntesis de datos para áreas de interés utilizando filtros aplicados.

Cuarto sprint: se agregó la funcionalidad de generación de informes para resumir la información filtrada, incluida una tabla de registros de la base de datos.

Quinto sprint: habilitado el registro de usuarios adicionales y la activación de la cuenta a través del correo electrónico de confirmación.

Además, se visualizaron las historias de usuario utilizando una herramienta de mapeo visual de historias, ilustrando los requisitos establecidos por el propietario del producto.

Diseño

La estructura del software fue diseñada para garantizar un modelo de datos simple y adaptable capaz de acomodar cambios potenciales durante la implementación. El equipo de desarrollo creó un modelo de arquitectura para representar visualmente las funcionalidades requeridas, empleando diagramas de casos de uso y maquetas para ilustrar las interacciones del usuario con la aplicación.

Se seleccionó una base de datos NoSQL para gestionar de manera eficiente el gran volumen de datos proporcionados por la red WWLLN. Además, se diseñó una arquitectura de software distribuida para admitir el escalado horizontal en versiones futuras, lo que permite la adición de nodos a medida que crece el volumen de datos. En la figura 2 se presenta la estructura de las tres colecciones de bases de datos, con sus propiedades detalladas en formato JSON.

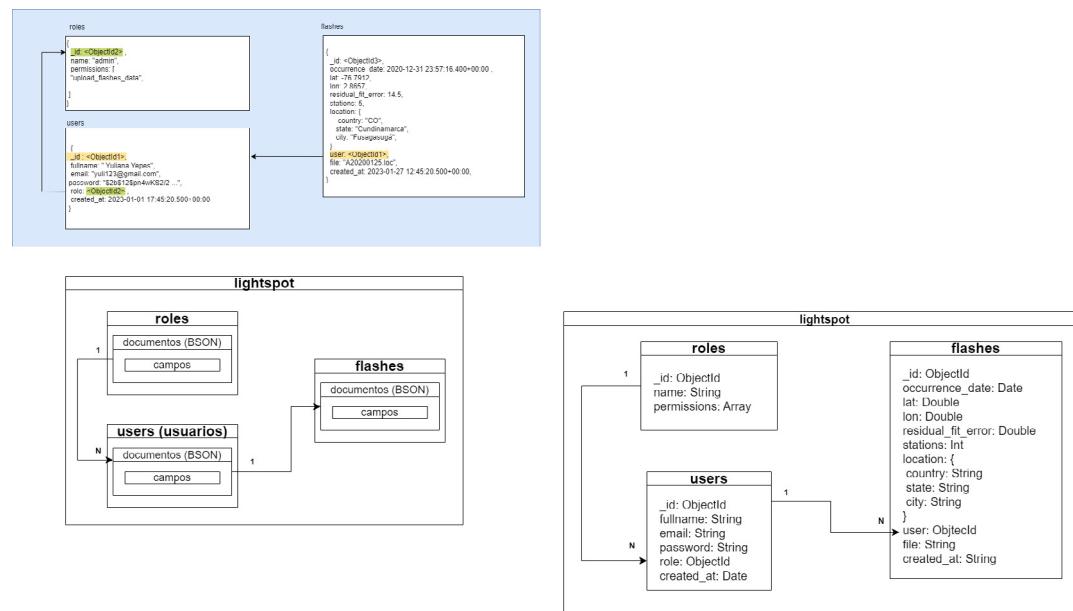


Figura 2. Representación del marco de recopilación de la aplicación web

La Figura 3 presenta el diagrama de caso y uso que muestra las funcionalidades del sistema desde la perspectiva del usuario final. El diagrama identifica a los actores involucrados e ilustra las relaciones entre ellos dentro del sistema.

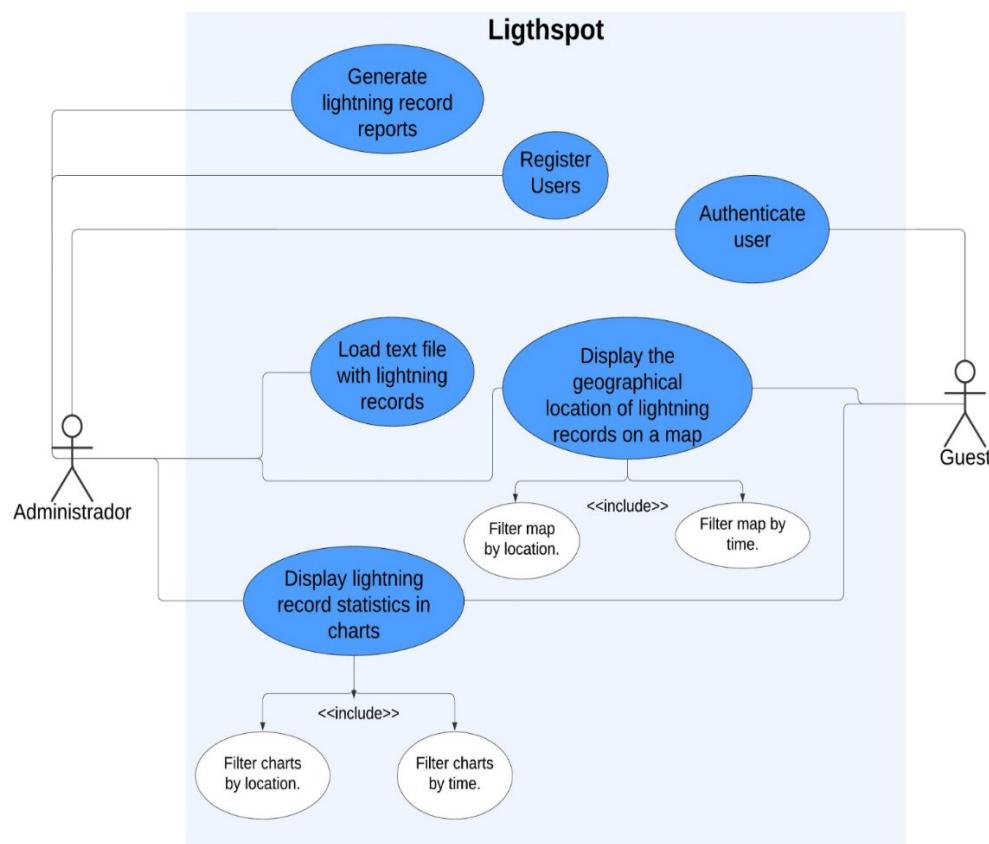


Figura 3. Diagrama de casos de uso de la aplicación web.

Se eligió el modelo C4 como marco arquitectónico para el sistema porque comunica de manera efectiva la estructura del software a las partes interesadas, promoviendo la calidad y la escalabilidad del producto. La Figura 4 presenta el diagrama de contexto, que ofrece una visión general del software y su entorno. Identifica las relaciones y los actores involucrados en el sistema, así como los sistemas externos que interactúan con Lightspot. Además, la Figura 4 ilustra las funcionalidades del software y su comunicación con servicios externos, como OpenStreetMap.

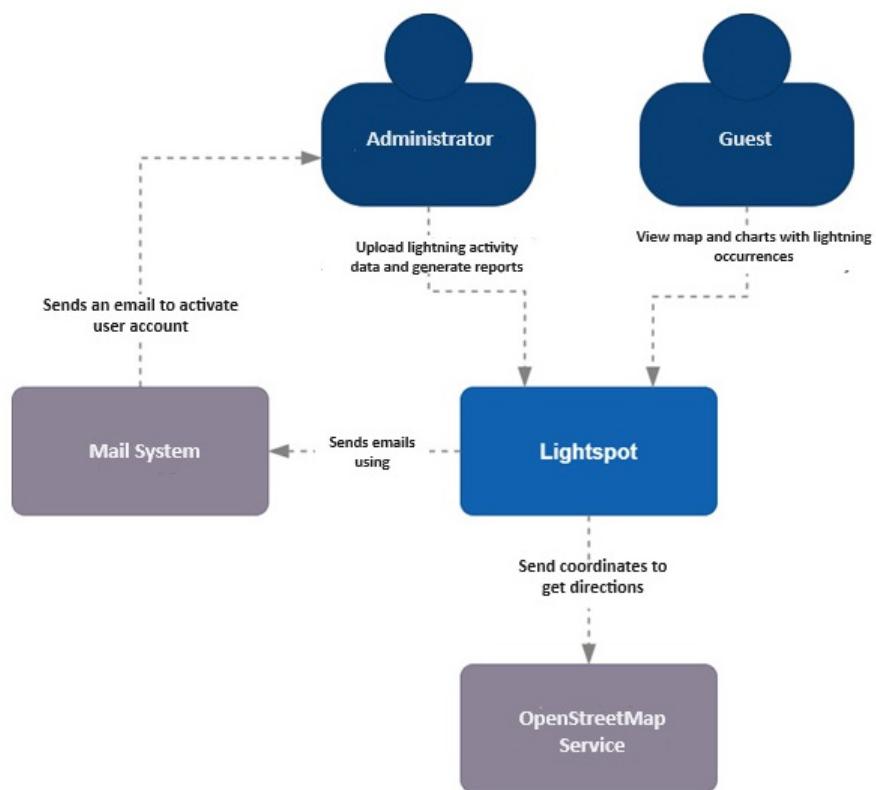


Figura 4. Diagrama de contexto que muestra las interacciones entre el sistema y las entidades externas.

En la figura 5 se describen los componentes del sistema, incluidas las aplicaciones, las bases de datos y los servicios web. Cada contenedor se identifica junto con sus funciones y las interfaces utilizadas para la comunicación entre ellos. Los contenedores identificados son:

Flashes: administra el servicio para cargar archivos, consultar registros mediante filtros y eliminar registros.

User: gestiona los servicios para el registro y listado de nuevos usuarios.

Role: administra y consulta roles.

Auth: maneja la autenticación de usuarios y la autorización de permisos según los roles.

Report: genera informes en formato PDF.

Remitente de correo electrónico: envía correos electrónicos mediante el protocolo SMTP.

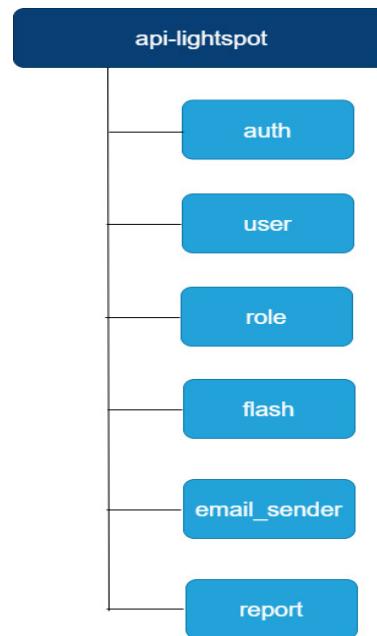


Figura 5. Arquitectura de contenedores de la aplicación web.

La siguiente fase de desarrollo se centró en la creación de un diagrama de componentes que describiera las funcionalidades de cada contenedor. Cada contenedor sigue una arquitectura en capas con tres componentes principales: el enrutador, que administra los puntos finales; el servicio, que contiene la lógica de negocios de su dominio; y el repositorio, que gestiona el acceso a los datos. Además, se crearon prototipos visuales (maquetas) para ilustrar las posibles interfaces de la aplicación utilizando la herramienta MockFlow.

Codificación

En esta fase, el equipo de desarrollo definió las tecnologías y los marcos para garantizar la creación de código fiable y fácil de mantener, al tiempo que simplificaba el desarrollo incremental del proyecto. Se presentaron las interfaces funcionales desarrolladas durante los sprints. Para el frontend, se eligió Vue.js por su capacidad para ejecutar JavaScript a través de Node.js, con Vuetify como marco. Vuetify proporciona componentes prediseñados que facilitan el desarrollo de interfaces intuitivas que se adhieren a las pautas de experiencia del usuario. La aplicación incluye funciones como la carga de archivos de texto, la visualización de registros en un mapa geográfico con marcadores específicos y la visualización de información a través de gráficos.

La interfaz de carga de archivos permite a los usuarios seleccionar un archivo de su computadora o arrastrarlo a un área designada. El servidor valida el formato del archivo, comprobando el tamaño y las restricciones de extensión. Si el archivo cumple con los requisitos, el sistema filtra los datos para Colombia y permite a los usuarios obtener una vista previa de hasta diez registros para verificar el formato. Si el formato es correcto, se activa el botón de carga, activando una barra de progreso que muestra el tiempo de carga estimado para almacenar los registros en la base de datos de MongoDB.

Como se muestra en la Figura 6, la visualización de datos en la función Mapa permite a los usuarios ver los registros almacenados en la base de datos en un mapa interactivo. Los usuarios pueden aplicar filtros de ubicación o tiempo para limitar los datos y centrarse en las áreas de interés. La visualización muestra marcadores en los lugares donde ocurrieron los rayos (latitud, longitud), con datos procesados en el servidor de OpenStreetMap.

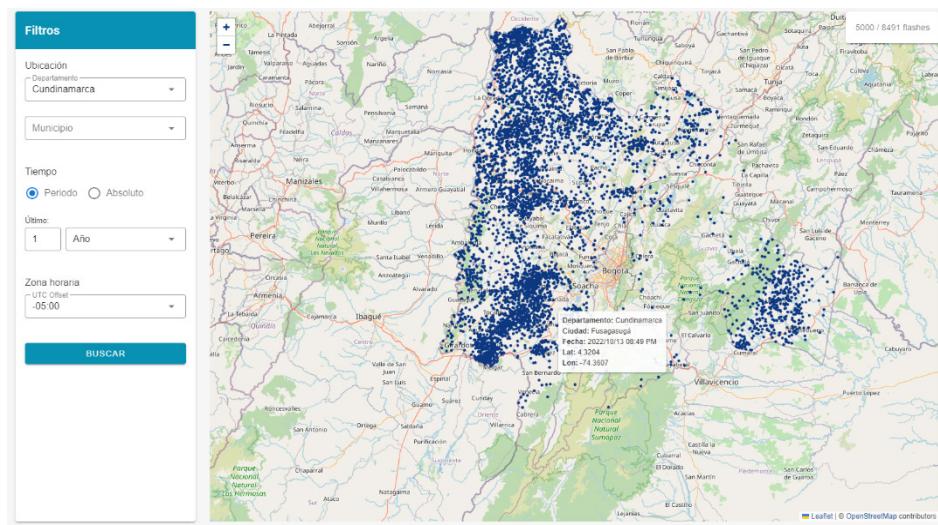


Figura 6. Interfaz de usuario que muestra la caída de rayos ocurridos en la primera quincena de octubre de 2022 en el departamento de Cundinamarca.

La barra lateral muestra los filtros disponibles que se pueden aplicar a los datos. Un filtro se basa en la ubicación, ofreciendo una lista de departamentos y permitiendo a los usuarios seleccionar un municipio. Otro filtro es por hora, donde los usuarios pueden elegir un rango de tiempo o una fecha específica. Esto se logra utilizando un campo numérico para ajustar el valor y una lista desplegable para seleccionar la unidad de tiempo: hora, día, semana, mes o año. Se crearon otros elementos visuales, como gráficos de barras verticales y horizontales, así como gráficos circulares, para resumir los datos y resaltar las ubicaciones y horas con mayor actividad de rayos. Las tarjetas de KPI se diseñaron para mostrar métricas clave para la toma de decisiones.

Las funcionalidades adicionales desarrolladas en la aplicación incluyeron el registro de usuarios, la activación de cuentas por correo electrónico, la autenticación de usuarios a través de inicio de sesión, la generación de informes y la eliminación de archivos cargados en las últimas 24 horas.

El backend se implementó en Python, utilizando FastAPI para construir la API de gateway, lo que facilitó la creación de endpoints para las funcionalidades propuestas. La base de datos se construyó con MongoDB, lo que ofrece una rápida recuperación de datos, lo que la hace adecuada para manejar las miles de solicitudes que procesa el servidor para obtener información relámpago. El control de versiones se gestionó mediante Git. Se aplicó un enfoque de arquitectura limpia para separar las responsabilidades del acceso a los datos, la lógica empresarial y la infraestructura. Para ello, se utilizó el contenedor de dependencias con la biblioteca dependency_injector. Los puntos de conexión se probaron con la herramienta Postman para simular las solicitudes de las interfaces de la aplicación. FastAPI generó documentación automática para los puntos finales.

Ensayo

Las pruebas funcionales verificaron el cumplimiento de los requisitos y la finalización de las historias de usuario propuestas, mientras que las pruebas de integración garantizaron la interacción adecuada entre todos los componentes externos de la aplicación. Las revisiones de los Sprint destacaron los productos mínimos viables, con explicaciones detalladas de las funcionalidades validadas por las pruebas proporcionadas a las partes interesadas. El equipo de desarrollo realizó pruebas manuales, evaluando los casos de uso de la aplicación en base a la siguiente fórmula:

$$m = \frac{\text{Number of approved tests}}{\text{Number of performed tests}}$$

En función de la métrica anterior, el valor de m se determinó en las siguientes condiciones:

Si $m = 1$, el software cumple con las expectativas del cliente.

Si $0,8 \leq m \leq 1$ hay algunos aspectos a mejorar.

Si $m \leq 0,79$ la iteración debe ser rechazada.

Se realizaron un total de veinte pruebas, cada una correspondiente a un escenario donde se lograron los resultados esperados. Los casos de prueba detallados se documentan en el informe de evaluación de la aplicación.

Lanzamiento

Después de completar todas las historias de usuario y desarrollar con éxito las funcionalidades requeridas, el desarrollo de la aplicación concluyó con la creación de un documento de entrega. Esta fase final incluyó el despliegue de la aplicación en dos plataformas en la nube, Vercel y Render, elegidas por su compatibilidad con JavaScript y Python y su perfecta integración con Git, lo que permite una transferencia eficiente del código fuente al entorno de producción.

Resultados

La evaluación del rendimiento de la aplicación web se centra en varios aspectos clave relacionados con su usabilidad y eficiencia. El tiempo necesario para procesar los archivos de datos Lightning oscila entre 5 y 15 minutos, dependiendo del número de registros. Por ejemplo, una prueba con más de 30.000 registros tenía un tiempo de carga de aproximadamente 6 minutos.

Para evaluar la funcionalidad de la aplicación web, se planificaron más de 20 pruebas funcionales, que incluyeron la lista de usuarios, el registro, la activación de cuentas, la carga de archivos, el filtrado de datos y la visualización de datos. Cada prueba incluía una descripción clara de la actividad, un procedimiento paso a paso y los resultados esperados. Además, se realizaron pruebas de integración con varios módulos externos, como OpenStreetMap. En la Tabla 3 se presenta un ejemplo de una prueba funcional realizada.

Tabla 3. Ejemplo de prueba funcional utilizada para evaluar el rendimiento de la aplicación web

Módulo	Activación de la cuenta de usuario
IDENTIFICACIÓN	20
Descripción	Cree una contraseña de usuario mediante un enlace.
Paso	Operación
1	Abrir enlace recibir por correo electrónico
2	Introduzca una nueva contraseña
3	Vuelva a ingresar la contraseña en el campo de confirmación
4	Haga clic en el botón Guardar
5	La plataforma registra automáticamente la nueva cuenta
Resultados esperados	Cree una nueva contraseña e inicie la sesión de un nuevo usuario

La prueba de funcionalidad final utilizó datos del WWLLN para identificar patrones de ocurrencia en la actividad de rayos. La prueba empleó un archivo de datos que contiene registros de los primeros quince días de octubre de 2022, con más de un millón de eventos de rayos en una amplia área, incluida Colombia. Cada archivo de registro contenía una tupla con información sobre un evento de rayo, incluida la latitud, la longitud, la marca de tiempo, la polaridad, la corriente máxima estimada y el número de estaciones que detectaron el evento. Las capacidades de filtrado de la aplicación redujeron el conjunto de datos a 8.510 eventos de rayos dentro de los límites del departamento de Cundinamarca. Un filtrado adicional reveló los cinco municipios con mayor actividad de rayos durante este período: Yacopí (946 eventos), Caparrapí (942 eventos), Puerto Salgar (481 eventos), Guaduas (473 eventos) y Medina (459 destellos). Los patrones indican que aproximadamente el 62% de la actividad de los rayos se produjo por la noche, con unos 5.200 eventos, alcanzando su punto máximo alrededor de las 9:00 p.m. hora local.

Discusión

Este proyecto desarrolló una herramienta que utiliza metodologías ágiles con el objetivo de analizar extensas colecciones de datos de rayos, haciendo hincapié en dos aspectos clave: la capacidad de la aplicación web para manejar grandes archivos de datos y sus herramientas analíticas para identificar patrones temporales y espaciales de rayos. La aplicación web se validó utilizando datos de rayos de Cundinamarca, Colombia, lo que demuestra la eficacia de la herramienta para abordar el tamaño y el formato de los archivos de datos, y permite una identificación gráfica de patrones, así como la visualización de puntos críticos de rayos particulares. Como se ha demostrado para trabajos similares en diferentes contextos, este tipo de enfoque resulta valioso para abordar las demandas de los desafíos del mundo real (21), (22).

La metodología XP y el marco Scrum demostraron ser un enfoque rápido y flexible para el desarrollo de software, ya que mostraron una fácil adaptabilidad a los requisitos cambiantes del proyecto, al tiempo que mantuvieron el impulso en el equipo de desarrollo. Una organización

estructurada y basada en las especificaciones iniciales garantizó una toma de decisiones eficiente y proporcionó un marco claro durante todo el ciclo de vida del proyecto.

El uso de la notación gráfica del modelo C4 para la arquitectura de software ofrecía información accesible sobre la estructura y la funcionalidad del sistema. Esta visualización fomentó la colaboración entre el equipo de desarrollo y las partes interesadas al establecer una comprensión compartida de los componentes de la aplicación, sus relaciones e interacciones. Este enfoque agilizó la resolución de problemas y alineó el sistema con las necesidades técnicas y comerciales, lo que ayudó a mantener el plan de actividades programado.

El uso de herramientas de código abierto fue fundamental para abordar los desafíos del desarrollo, en particular para gestionar las complejidades de los grandes conjuntos de datos y los grandes volúmenes de solicitudes. Aunque estas herramientas impusieron algunas limitaciones, su aplicación estratégica mitigó obstáculos clave. Sin embargo, está bastante claro que en algún momento se deben tomar algunas decisiones importantes en torno a la aplicación web, especialmente en lo que respecta al almacenamiento de datos y las funcionalidades GIS, ya que durante el desarrollo aparecen algunos desafíos relacionados con el manejo de grandes conjuntos de datos dentro de un entorno web limitado por las restricciones de los servicios gratuitos. La segmentación de datos proporcionó una solución práctica, pero se planea una implementación de servidor local para superar esta limitación. Otras mejoras incluyen la integración de herramientas geográficas de código abierto como OpenStreetMap y el desarrollo de una API para obtener datos en tiempo real de la Red Mundial de Localización Lightning.

En su forma actual, la aplicación web es muy adecuada para el análisis de datos de rayos y se alinea con desarrollos de software más amplios en minería de datos, reconocimiento de patrones y sistemas de alerta temprana para fenómenos naturales como tornados y terremotos. Estas capacidades posicionan a la herramienta como un activo valioso para avanzar en la investigación relacionada con los rayos y contribuir a los sistemas predictivos y de mitigación de riesgos que fueron probados y validados por pruebas funcionales y de integración destinadas a garantizar la calidad y el rendimiento.

La herramienta desarrollada es muy relevante para las autoridades responsables de la evaluación de riesgos, ya que permite identificar áreas con una actividad de rayos elevada y, en consecuencia, ubicaciones con mayor riesgo de impactos de rayos en personas, animales e infraestructura. Si bien no se pueden evitar los rayos, la implementación de medidas de protección, como sistemas de protección contra rayos en escuelas, lugares deportivos y otras instalaciones de grandes reuniones, es una estrategia viable. Además, la identificación de meses y horas específicos con actividad intensa de rayos ayuda a crear protocolos de seguridad para actividades al aire libre, reduciendo efectivamente los riesgos asociados. Desde esta perspectiva, la herramienta proporciona información crítica para la planificación estratégica y las iniciativas educativas. Al ofrecer conocimientos básicos sobre los rayos y los procedimientos de seguridad recomendados, empodera a las comunidades locales para que adopten medidas proactivas, mejorando su seguridad y resiliencia.

Conclusiones

La capacidad de la aplicación web para mapear eventos de rayos facilita la identificación gráfica de puntos calientes. Esta característica es crucial para evaluar los riesgos para la infraestructura, las vidas humanas y los animales en áreas propensas a los rayos. La identificación de patrones es valiosa para planificar estrategias de mitigación de riesgos más eficaces. Además, este desarrollo establece una base para avanzar en la investigación sobre la climatología detallada de los rayos, complementando los estudios globales y regionales existentes. El enfoque presentado en este artículo documenta el proceso de creación de herramientas basadas en software para la investigación de rayos, ofreciendo beneficios significativos para aquellos interesados en ingresar a este campo de estudio.

Declaración de contribución de autoría CRediT

Conceptualización - Ideas: Fernando Augusto Díaz Ortiz. Curación de datos: Johan Romero Romero, Karen Yepes Chala. Análisis formal: Fernando Augusto Díaz Ortiz. Adquisición de financiación: Fernando Augusto Díaz Ortiz. Investigación: Fernando Augusto Díaz Ortiz. Metodología: Johan Romero Romero, Karen Yepes Chala. Dirección de Proyecto: Pedro Luis Cifuentes Guerrero. Recursos: Johan Romero Romero, Karen Yepes Chala. Software: Johan Romero Romero, Karen Yepes Chala. Supervisión: Pedro Luis Cifuentes Guerrero. Validación: Fernando Augusto Díaz Ortiz, Pedro Luis, Cifuentes Guerrero. Visualización - Elaboración: Johan Romero Romero, Karen Yepes Chala. Redacción - borrador original - Elaboración: Johan Romero Romero, Karen Yepes Chala. Redacción - revisión y edición - Elaboración: Fernando Augusto Díaz Ortiz.

Financiamiento: Universidad de Cundinamarca

Conflicto de intereses: no declara.

Referencias

- (1) V. Cooray, *An Introduction to Lightning*. Springer, 2015. doi: 10.1007/978-94-017-8938-7.
- (2) V. Rakov and M. a. Uman, *Lightning: Physics and Effects*. Cambridge University Press, 2007.
- (3) C. Cimarelli and K. Genareau, "A review of volcanic electrification of the atmosphere and volcanic lightning," *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 422, p. 107449, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2021.107449.
- (4) B. Vonnegut, D. J. Latham, C. B. Moore, and S. J. Hunyady, "An explanation for anomalous lightning from forest fire clouds," *J. Geophys. Res.*, vol. 100, no. D3, pp. 5037–5050, Mar. 1995, doi: 10.1029/94JD02956.
- (5) T. J. Lang et al., "WMO world record lightning extremes: Longest reported flash distance and longest reported flash duration," *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 98, no. 6, pp. 1153–1168, 2017, doi: 10.1175/BAMS-D-16-0061.1.

- (6) R. Albrecht, S. Goodman, D. Buechler, R. Blakeslee, and H. Christian, "Where are the lightning hotspots on Earth?," *Bulletin America Meteorological Society*, vol. 97, no. November, pp. 2051–2068, 2016, doi: 10.1175/BAMS-D-14-00193.1.
- (7) D. J. Cecil, D. E. Buechler, and R. J. Blakeslee, "TRMM LIS climatology of thunderstorm occurrence and conditional lightning flash rates," *Journal of Climate*, vol. 28, no. 16, pp. 6536–6547, 2015, doi: 10.1175/JCLI-D-15-0124.1.
- (8) D. E. Villamil, H. E. Rojas, F. Santamaría, and W. Diaz, "Lightning Risk and Disaster Risk Management at the beginning of the 2020s," in 2021 35th International Conference on Lightning Protection (ICLP) and XVI International Symposium on Lightning Protection (SIPDA), Colombo, Sri Lanka: IEEE, Sep. 2021, pp. 01–05. doi: 10.1109/ICLPandSIPDA54065.2021.9627393.
- (9) A. S. Cruz-Bernal, H. Torres-Sánchez, H. Aranguren-Fino, and J. C. Inampués-Borda, "Lightning mortality rate in Colombia for the period 1997 – 2014," *Revista UIS Ingenierías*, vol. 17, no. 2, Art. no. 2, Jun. 2018, doi: 10.18273/revuin.v17n2-2018006.
- (10) A. S. Cruz-Bernal, "Evaluación del riesgo por rayos para Colombia (Universidad Nacional de Colombia)," Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Recuperado de https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/75636/ASCB_Evaluaci%C3%B3n%20del%20riesgo%20por%20rayos%20para%20Colombia.pdf, 2019.
- (11) D. Aranguren, J. Lopez, J. Montanyà, and H. Torres, "Natural observatories for lightning research in Colombia," in 2018 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA), Cartagena, Colombia, 2018, pp. 279–283. doi: 10.1109/ICEAA.2018.8520371.
- (12) A. Rousseau, "Risk Assessment for Lightning Protection," in *Lightning: Science, Engineering, and Economic Implications for Developing Countries*, C. Gomes, Ed., Singapore: Springer, 2021, pp. 79–113. doi: 10.1007/978-981-16-3440-6_3.
- (13) X. Qie et al., "A review of atmospheric electricity research in China," *Advances in Atmospheric Sciences*, vol. 32, no. 2, pp. 169–191, 2015, doi: 10.1007/s00376-014-0003-z.
- (14) A. Alammari et al., "Lightning Mapping: Techniques, Challenges, and Opportunities," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 190064–190082, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3031810.
- (15) F. Lyu et al., "A low-frequency near-field interferometric-TOA 3-D Lightning Mapping Array," *Geophysical Research Letters*, vol. 41, no. 22, pp. 7777–7784, 2014, doi: 10.1002/2014GL061963.
- (16) M. W. Onah, J. A. Adéchinan, F. K. Guédjé, H. Kougbeagbédé, and E. B. Hougninou, "Evaluation of the performance of the World Wide Lightning Location Network (WWLLN) using the lightning detection network (LINET) as a truth," *Bull. of Atmos. Sci.& Technol.*, vol. 4, no. 1, p. 7, Jul. 2023, doi: 10.1007/s42865-023-00060-9.

- (17) J. O. Kaplan and K. H.-K. Lau, "World Wide Lightning Location Network (WWLLN) Global Lightning Climatology (WGLC) and time series, 2022 update," *Earth System Science Data*, vol. 14, no. 12, pp. 5665–5670, 2022.
- (18) C. Plaisant and B. Shneiderman, "Lightning and Thunder: The Early Days of Interactive Information Visualization at the University of Maryland," *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 42, no. 4, pp. 103–113, Jul. 2022, doi: 10.1109/MCG.2022.3180012.
- (19) M. Falco, M. G. Nicora, D. Baissac, M. F. Barle, M. Salaberri, and G. Robiolo, "GeoRayos, a Web and Mobile App to Increase Awareness on Lightning Strikes," in *2021 XLVII Latin American Computing Conference (CLEI)*, Oct. 2021, pp. 1–9. doi: 10.1109/CLEI53233.2021.9640001.
- (20) F. Ahmed, S. Hasan, I. M. Mahbubul, M. Abul Kalam Mallik, and M. Nafiz Hossen, "GIS-based spatial analysis for lightning scenario in Bangladesh," *Heliyon*, vol. 10, no. 7, p. e28708, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e28708.
- (21) R. Buitrago, J. C. Rodríguez, C. Obando, and H. F. Hernández, "Desarrollo de un APP informativo para situaciones de riesgos sismológico para la ciudad de Bogotá," *Ingeniería y Competitividad*, vol. 21, no. 2, Art. no. 2, Jul. 2019, doi: 10.25100/iyc.v21i2.7179.
- (22) R. D. B. Contreras Manrique, L. Contreras Manrique, and A. M. Figueroa Hernández, "Inclusión de estudiantes con discapacidad diferencial auditiva a través de la aplicación móvil ListenApp," *inycomp*, vol. 24, no. 1, Oct. 2021, doi: 10.25100/iyc.v24i1.11070.