



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**PUESTA EN OPERACIÓN DE UNA RED DE ESTACIONES DE DETECCIÓN DE  
DESCARGAS ATMOSFÉRICAS PARA EVALUAR LA DENSIDAD DE LOS EVENTOS EN EL  
TERRITORIO NACIONAL (INSIVUMEH)**

**Mario Rubén Rosales Nájera**

Asesorado por el Ing. Araely Ovidio Reyes Carrillo

Guatemala, mayo de 2024

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PUESTA EN OPERACIÓN DE UNA RED DE ESTACIONES DE DETECCIÓN DE  
DESCARGAS ATMOSFÉRICAS PARA EVALUAR LA DENSIDAD DE LOS EVENTOS EN EL  
TERRITORIO NACIONAL (INSIVUMEH)**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**MARIO RUBÉN ROSALES NÁJERA**

ASESORADO POR EL ING. ARAELY OVIDIO REYES CARRILLO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO**

GUATEMALA, MAYO DE 2024

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. José Francisco Gómez Rivera (a. i.)
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Ing. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Ing. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. José Francisco Gómez Rivera (a. i.)
EXAMINADOR	Ing. Kenneth Issur Estrada Ruiz
EXAMINADOR	Ing. Natanael Jonathan Requena Gómez
EXAMINADORA	Inga. Ana María Navarro Orozco
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**PUESTA EN OPERACIÓN DE UNA RED DE ESTACIONES DE DETECCIÓN DE  
DESCARGAS ATMOSFÉRICAS PARA EVALUAR LA DENSIDAD DE LOS EVENTOS EN EL  
TERRITORIO NACIONAL (INSIVUMEH)**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 05 de octubre de 2020.

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Mario Rubén Rosales Nájera', written in a cursive style.

**Mario Rubén Rosales Nájera**

Guatemala 31 de octubre de 2023

Ing. Oscar Argueta Hernández  
Director Unidad de EPS  
Facultad de Ingeniería  
Presente:

Estimado Ingeniero Argueta Hernández.

Por este medio atentamente me sirve notificarle que como Asesor de la Práctica del Ejercicio Profesional Supervisado (E.P.S), del estudiante universitario **Mario Rubén Rosales Nájera** de la Carrera de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Registro Académico No. **201245831** y CUI **2243 21706 0511** , procedí a revisar el informe final, cuyo título es **"PUESTA EN OPERACIÓN DE UNA RED DE ESTACIONES DE DETECCIÓN DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS PARA EVALUAR LA DENSIDAD DE LOS EVENTOS EN EL TERRITORIO NACIONAL -INSIVUMEH-"**.

En tal virtud, **LO DOY POR APROBADO**, solicitándole darle el trámite respectivo

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,



**Araely Ovidio Reyes Carrillo**  
**Ingeniero Electrónico**  
**Colegiado No. 20,588**

Ing. Araely Ovidio Reyes Carrillo  
Asesor de EPS  
Colegiado No. 20,588  
-INSIVUMEH-



Guatemala 15 de noviembre de 2023.  
REF.EPS.DOC.B.149.15.11.2023

Ing. Oscar Argueta Hernández  
Director Unidad de EPS  
Facultad de Ingeniería  
Presente

Estimado Ingeniero Argueta Hernández.

Por este medio atentamente le informo que como Asesor-Supervisor de la Práctica del Ejercicio Profesional Supervisado (E.P.S.), del estudiante universitario **Mario Rubén Rosales Nájera** de la Carrera de Ingeniería mecánica Eléctrica, Registro Académico No. **201245831** y CUI **2243217060511**, procedí a revisar el informe final, cuyo título es **“PUESTA EN OPERACIÓN DE UNA RED DE ESTACIONES DE DETECCIÓN DE DESCARGAS ATMOSFERICAS PARA EVALUAR LA DENSIDAD DE LOS EVENTOS EN EL TERRITORIO NACIONAL -INSIVUMEH ”**.

En tal virtud, **LO DOY POR APROBADO**, solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”

  
Ing. Kenneth Issur Estrada Ruiz  
Asesor-Supervisor de EPS  
Área de Ingeniería Eléctrica



c.c. Archivo



Guatemala 17 de noviembre de 2023.  
REF.EPS.DOC.B.150.15.11.2023

Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo  
Director Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería  
Presente

Estimado Ingeniero Rivera Carrillo.

Por este medio atentamente le envío el informe final correspondiente a la práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) titulado **" PUESTA EN OPERACIÓN DE UNA RED DE ESTACIONES DE DETECCIÓN DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS PARA EVALUAR LA DENSIDAD DE LOS EVENTOS EN EL TERRITORIO NACIONAL -INSIVUMEH "** que fue desarrollado por el estudiante universitario, **Mario Rubén Rosales Nájera**, quien fue debidamente asesorado por el Ing. Ing. Araely Ovidio Reyes Carrillo y supervisado por el Ing. Kenneth Issur Estrada Ruiz.

Por lo que habiendo cumplido con los objetivos y requisitos de ley del referido trabajo y existiendo la aprobación del mismo por parte del Asesor y del Supervisor de EPS, en mi calidad de Director apruebo su contenido solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,  
"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Oscar Argueta Hernández  
Director Unidad de EPS

c.c/Archivo

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA



REF. EIME 03.2024.

30 DE ENERO 2024

Señor Director

Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo

Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

**Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación de EPS titulado: PUESTA EN OPERACIÓN DE UNA RED DE ESTACIONES DE DETECCIÓN DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS PARA EVALUAR LA DENSIDAD DE LOS EVENTOS EN EL TERRITORIO NACIONAL - INSIVUMEH- del estudiante: Mario Rubén Rosales Nájera, que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.**

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,  
**ID Y ENSEÑAD A TODOS**

Ing. José Anibal Silva de los Angeles  
Coordinador de Electrotécnica

sro



SIST.LNG.DIRECTOR.1.EIME.2024

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante Mario Ruben Rosales Najera: PUESTA EN OPERACIÓN DE UNA RED DE ESTACIONES DE DETECCIÓN DE DESCARGAS ATMOSFERICAS PARA EVALUAR LA DENSIDAD DE LOS EVENTOS EN EL TERRITORIO NACIONAL -INSIVUMEH-, procede a la autorización del mismo.



Ingeniero Armando Alonso Rivera Carrillo  
Director  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

Guatemala, marzo de 2024



**USAC**  
TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Decanato  
Facultad de Ingeniería

24189101- 24189102

LNG.DECANATO.OIE.196.2024

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **PUESTA EN OPERACIÓN DE UNA RED DE ESTACIONES DE DETECCIÓN DE DESCARGAS ATMOSFERICAS PARA EVALUAR LA DENSIDAD DE LOS EVENTOS EN EL TERRITORIO NACIONAL -INSIVUMEH-**, presentado por: **Mario Ruben Rosales Najera** después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. José Francisco Gómez Rivera  
Decano a.i.

Guatemala, mayo de 2024



Para verificar validez de documento ingrese a <https://www.ingenieria.usac.edu.gt/firma-electronica/consultar-documento>

Tipo de documento: Correlativo para orden de impresión Año: 2024 Correlativo: 196 CUI: 2243217060511

Escuelas: Ingeniería Civil, Ingeniería Mecánica Industrial, Ingeniería Química, Ingeniería Mecánica Eléctrica, - Escuela de Ciencias, Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS). Postgrado Maestría en Sistemas Mención Ingeniería Vial. Carreras: Ingeniería Mecánica, Ingeniería Electrónica, Ingeniería en Ciencias y Sistemas. Licenciatura en Matemática. Licenciatura en Física. Centro de Estudios Superiores de Energía y Minas (CESEM). Guatemala, Ciudad

## **ACTO QUE DEDICO A:**

### **Dios**

Por ser una importante influencia en mi carrera y darme la oportunidad de vivir.

### **Mis padres**

Rubén Rosales y Clara Luz de Rosales por su apoyo incondicional, confianza y esfuerzo, este triunfo también es de ellos.

### **Mi familia**

Rocio Ramirez Morales y Yuri Nicole Rosales por ser el motor que impulsa mi vida.

### **Mi hermana**

Olimpia Rosales por mantenerme presionado para alcanzar esta meta.

### **Mis amigos**

Por formar parte importante en esta aventura.

## AGRADECIMIENTOS A:

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por ser la <i>alma mater</i> en mis estudios universitarios.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por ser el instrumento de enseñanza durante mi carrera universitaria.
<b>INSIVUMEH</b>	Por permitirme ser encargado de realizar este proyecto.
<b>Ing. Kenneth Estrada</b>	Por apoyo en todo momento y guía durante la finalización de este proceso.
<b>Mis amigos</b>	Por crear un recuerdo inolvidable al compartir tantos momentos gratos como desafiantes.
<b>Centro Educativo Técnico Laboral KINAL</b>	Por ser parte de mi formación, tanto técnica como personal.
<b>Mis catedráticos</b>	Por guiarme en el transcurso de esta gran aventura, por su paciencia, bondad y sabiduría.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
GLOSARIO.....	IX
RESUMEN .....	XIII
OBJETIVOS .....	XV
INTRODUCCIÓN.....	XVII
1. INFORMACIÓN GENERAL DEL INSTITUTO NACIONAL DE SISMOLOGÍA, VULCANOLOGÍA, METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA .....	1
1.1. Historia .....	1
1.2. Misión .....	2
1.3. Visión .....	3
1.4. Estructura .....	3
1.4.1. Departamento administrativo – financiero .....	3
1.4.2. Departamento de Investigación y Servicios Hídricos .....	4
1.4.3. Departamento de investigación y servicios Meteorológicos .....	5
1.4.4. Departamento de investigación y servicios geofísicos .....	5
1.5. Organigrama .....	6
2. MARCO TEÓRICO .....	7
2.1. Descargas electroatmosféricas.....	7
2.1.1. Comportamiento eléctrico de la atmósfera .....	7

2.1.2.	Cómo se generan las descargas electroatmosféricas .....	8
2.1.3.	Formación de propagación de una descarga electroatmosférica .....	9
2.1.4.	Polaridad de descargas electroatmosféricas .....	11
2.1.5.	Tipos de descargas electroatmosféricas.....	14
2.1.6.	Frecuencias de las descargas de descargas electroatmosféricas .....	17
2.1.7.	Densidad de descargas electroatmosféricas en la tierra .....	17
2.1.8.	Actividad total de descargas electroatmosféricas ...	18
2.2.	Redes de detección de descargas electroatmosféricas .....	18
2.2.1.	Detector de descargas electroatmosféricas .....	19
2.2.2.	Red de detección de descargas electroatmosféricas .....	20
2.2.3.	Métodos de detección de descargas eléctricas atmosféricas .....	21
3.	MARCO METODOLÓGICO .....	25
3.1.	Georreferenciación.....	25
3.2.	Localización .....	26
3.3.	Delimitación del campo de estudio .....	28
3.3.1.	Condiciones de instalación .....	28
3.4.	Recursos disponibles .....	29
3.4.1.	Transmisión de datos .....	30
3.4.2.	Suministro eléctrico .....	30
3.4.3.	Puesta a tierra .....	32
3.5.	Herramienta .....	34
3.5.1.	Recursos materiales.....	34

3.5.2.	Condiciones generales para la instalación y operación de una estación .....	35
4.	CONDICIONES TÉCNICAS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED DE DETECCIÓN DE DESCARGAS ELECTROATMOSFÉRICAS .....	37
4.1.	Estructura de red de detección de descargas electroatmosféricas .....	37
4.2.	Componentes de una estación de detección de descargas electroatmosféricas .....	39
4.2.1.	Antena .....	39
4.2.1.1.	Antena de detección de golpes .....	39
4.2.1.2.	Antena GPS .....	43
4.2.2.	Protección de línea, distribución y respaldo del sistema de UPS .....	45
4.2.2.1.	Características técnicas .....	45
4.2.3.	Procesador de señal (LPS-200U) .....	47
4.2.4.	Mástil .....	48
4.3.	Protecciones .....	49
4.3.1.	OVR T2 40-150 CU.....	49
4.3.1.1.	Características técnicas .....	50
4.3.2.	Breaker Alterch Corp B10 .....	50
5.	IMPLEMENTACIÓN DE RED DE ESTACIONES DE DETECCIÓN DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS PARA EVALUAR LA DENSIDAD DE LOS EVENTOS.....	53
5.1.	Toa system status viewer .....	53
5.2.	Toa solution data tool .....	55
5.2.1.	Visualización en tiempo real .....	59
5.3.	Análisis de datos obtenidos .....	62
5.3.1.	Procesamiento.....	63

6.	MANUAL DE MANTENIMIENTO .....	67
6.1.	Hardware .....	67
6.2.	Software .....	68
	CONCLUSIONES.....	71
	RECOMENDACIONES .....	73
	REFERENCIAS.....	75
	APÉNDICE .....	79



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

<b>Figura 1.</b>	Organigrama INSIVUMEH.....	6
<b>Figura 2.</b>	Proceso de descarga atmosférica de una nube a tierra .....	11
<b>Figura 3.</b>	Polaridad positiva .....	12
<b>Figura 4.</b>	Polaridad negativa .....	13
<b>Figura 5.</b>	Característica del cortocircuito un rayo .....	14
<b>Figura 6.</b>	Descargas electroatmosféricas.....	15
<b>Figura 7.</b>	Formas de descargas por descargas electroatmosféricas... .	16
<b>Figura 8.</b>	Espectro radioeléctrico en una descarga electroatmosférica	20
<b>Figura 9.</b>	Antena de cuadro .....	22
<b>Figura 10.</b>	Espectro radioeléctrico .....	24
<b>Figura 11.</b>	Servicio técnico GPS .....	26
<b>Figura 12.</b>	Localización.....	27
<b>Figura 13.</b>	Verificación de ruido mediante el comando status .....	29
<b>Figura 14.</b>	Diagrama eléctrico.....	31
<b>Figura 15.</b>	Medición de puesta a tierra estación INSIVUMEH GT .....	34
<b>Figura 16.</b>	Adelsystem CBI 123A.....	38
<b>Figura 17.</b>	Antena detección de golpes .....	41
<b>Figura 18.</b>	Antena detección de golpes física .....	42
<b>Figura 19.</b>	Trimble bullet III.....	433
<b>Figura 20.</b>	Adelsystem CBI 123A.....	466
<b>Figura 21.</b>	Batería ácido-plomo .....	466
<b>Figura 22.</b>	Procesador de señal LPS-200U .....	477
<b>Figura 23.</b>	Mástil.....	488

<b>Figura 24.</b>	OVR T2 40-150 (derecha) y ALTECH B10 (izquierda) .....	499
<b>Figura 25.</b>	Programa TOA System Status Viewer.....	54
<b>Figura 26.</b>	Botón para ver todas las opciones de descarga .....	55
<b>Figura 27.</b>	Permisos TOA Solution Data Tool .....	56
<b>Figura 28.</b>	Parámetros de área de estudio .....	56
<b>Figura 29.</b>	Densidad de área de estudio.....	57
<b>Figura 30.</b>	Tipo de archivo de descarga .....	57
<b>Figura 31.</b>	Visualización de eventos encontrados.....	58
<b>Figura 32.</b>	Metadata en archivo Excel .....	59
<b>Figura 33.</b>	Tipos de descarga electroatmosféricas detectados .....	60
<b>Figura 34.</b>	Detección .....	61
<b>Figura 35.</b>	Incerteza .....	61
<b>Figura 36.</b>	Diagrama transmisión .....	63
<b>Figura 37.</b>	Fichero de script.....	64
<b>Figura 38.</b>	Fichero de script.....	69

## TABLAS

<b>Tabla 1.</b>	Localización .....	27
<b>Tabla 2.</b>	Consumo.....	32
<b>Tabla 3.</b>	Datos analizados.....	64

## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
<b>A</b>	Amperio
<b>DC</b>	Corriente continua
<b>°</b>	Grados sexagesimales
<b>Hz</b>	<i>Hertz</i>
<b>kA</b>	Kiloamperios
<b>KHz</b>	Kilo-Hertz
<b>mA</b>	Miliamperio
<b>ms</b>	Milisegundo
<b>rad</b>	Radianes
<b>SAF</b>	Monitoreo y alerta de descarga electroatmosféricas por interferometría radioeléctrica.
<b>T</b>	Temperatura
<b>V</b>	Volt
<b>V<sub>cc</sub></b>	Voltaje de alimentación
<b>V<sub>in</sub></b>	Voltaje de entrada
<b>V<sub>o</sub></b>	Voltaje de salida
<b>V<sub>in</sub></b>	Voltaje de entrada
<b>V<sub>out</sub></b>	Voltaje de salida
<b>W</b>	Watt



## **GLOSARIO**

<b>Climatología</b>	Estudia la variación de los elementos meteorológicos cerca de la tierra en un área reducida.
<b>Descargas atmosféricas</b>	Transferencia de cargas eléctricas.
<b>GPS</b>	Sistema de Posicionamiento Global
<b>Hardware</b>	Parte física tangible de un sistema informático.
<b>INSIVUMEH</b>	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.
<b>Iones</b>	Partículas con carga positiva o negativa.
<b>LF</b>	<i>Low Frequency</i> (frecuencias baja)
<b>LPATS</b>	Sistema de posicionamiento y seguimiento de descarga electroatmosféricas
<b>MDF</b>	Buscador de dirección magnética. ( <i>Magnetic Direction Finding</i> , en inglés).

<b>Meteorología</b>	Ciencia encargada del estudio de las diferentes propiedades, eventos y fenómenos que tienen lugar en la atmósfera de la tierra.
<b>Rayo</b>	Es una impresionante manifestación de electricidad estática en la naturaleza, generada durante una tormenta eléctrica que produce un potente pulso electromagnético.
<b>Relámpago</b>	Resplandor resultado del impacto entre nubes tormentosas cargadas de electricidad estática.
<b>Software</b>	Conjunto de programas y rutinas que permiten a la computadora realizar determinadas tareas
<b>Trueno</b>	Estruendo ensordecedor que es generado por la expansión explosiva del aire al ser atravesado por la descarga eléctrica.
<b>TCP/IP</b>	Descripción de protocolos de red desarrollada en la década de 1970. Protocolo de control de transmisión ( <i>Transmission control protocol</i> ), permite establecer una conexión y el intercambio de datos entre dos o más anfitriones.
<b>VHF</b>	<i>Very High Frequency</i> (frecuencias muy altas)
<b>VLF</b>	<i>Very Low Frequency</i> (frecuencias muy baja)

**VSWR**

En español, se conoce Relación de Onda Estacionaria (ROE), relación entre la onda estacionaria de voltaje transmitida y reflejada en la frecuencia de radio. Representa la relación geométrica entre el voltaje máximo y mínimo en el sistema. (*Voltage Standing Wave Ratio*, en inglés).

**VPN**

Una conexión segura y cifrada entre dos redes, o entre un usuario determinado y una red. (*Virtual Private Network*, en inglés).





## **RESUMEN**

Las estaciones diseñadas para la detección de descargas electroatmosféricas, son sistemas meticulosamente elaborados con el propósito de registrar y analizar con precisión las descargas que se producen durante las tormentas atmosféricas. Su función primordial radica en identificar la presencia de descarga electroatmosféricas y desencadenar alertas tempranas, lo cual conlleva a la implementación de medidas preventivas en diversos sectores, tales como la industria, el turismo y la agricultura. La disposición estratégica de estas estaciones en puntos clave del territorio, es esencial para abarcar una extensa área geográfica, obtener información detallada acerca de la frecuencia y densidad de las cargas eléctricas.

En este contexto, el presente proyecto se enfoca en la creación y desarrollo de una red integral, de estaciones destinadas al análisis exhaustivo de las tormentas eléctricas, en el territorio de Guatemala. Su objetivo central reside en la generación de datos en tiempo real, los cuales posibilitarán un monitoreo ininterrumpido desde la sede central del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH) información precisa y actualizada, constituyendo así, una herramienta de inestimable valor para la comprensión y anticipación de los fenómenos asociados a las tormentas eléctricas en el país.



## **OBJETIVOS**

### **General**

Diseñar, implementar y analizar una red de estaciones de monitoreo automático para la detección de descargas electroatmosféricas a nivel nacional, en colaboración con el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología e Hidrología (INSIVUMEH).

### **Específicos**

1. Realizar un análisis de las ubicaciones potenciales para garantizar el óptimo funcionamiento de la red de estaciones a nivel nacional, siguiendo los lineamientos establecidos por el fabricante y aprovechando los sitios otorgados por INSIVUMEH.
2. Realizar un análisis del sistema de puesta a tierra en los puntos seleccionados para la instalación de cada equipo, y realizar modificaciones que sean necesarias para garantizando una adecuada protección y funcionamiento de las estaciones para la detección de descargas atmosféricas.
3. Establecer, a través de la recolección de datos, la densidad de descargas electroatmosféricas a nivel nacional por kilómetro cuadrado ( $\text{km}^2$ ), proporcionando información relevante para futuros estudios y medidas de prevención.

4. Capacitar al personal de la institución en la correcta manipulación y análisis de datos para la generación de alertas tempranas, con el propósito de contribuir significativamente a la prevención de riesgos asociados con tormentas eléctricas dentro del territorio guatemalteco.

## INTRODUCCIÓN

El objetivo de este trabajo consiste en desarrollar el diseño e implementación, de una red de estaciones de detección de descargas atmosféricas, para evaluar la densidad de estos eventos en todo el territorio nacional. Bajo la observación del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH).

La red consta de cinco estaciones estratégicamente ubicadas, su propósito es recopilar datos relevantes y elaborar modelos, que permitan establecer en el futuro un sistema de alerta temprana de tormentas eléctricas en el país. Esta iniciativa contribuirá significativamente a la prevención de riesgos, asociados con actividades industriales y turísticas, que podrían verse afectadas por tormentas eléctricas.

Cabe destacar que la instalación de esta red de estaciones ha sido posible, gracias a la generosa donación proporcionada por la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID), al Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH), demostrando así, una valiosa cooperación internacional para el desarrollo y la seguridad de la población frente a fenómenos atmosféricos peligrosos.



# **1. INFORMACIÓN GENERAL DEL INSTITUTO NACIONAL DE SISMOLOGÍA, VULCANOLOGÍA, METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA**

## **1.1. Historia**

El instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, es conocido por sus siglas como INSIVUMEH, se originó a raíz del terremoto ocurrido en Guatemala, el 4 de febrero de 1976, y es una institución técnico-científica, que ejecuta actividades asociadas a las ciencias atmosféricas, geofísicas e hidrológicas.

El Observatorio Nacional, una entidad adscrita al Ministerio de Agricultura, se constituyó en colaboración con el departamento de Meteorología de la Dirección General de Aeronáutica Civil, vinculado al Ministerio de Comunicaciones y Obras Públicas (actualmente parte del Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda); así como, con la sección de Construcción y Mantenimiento de la red Hidrometeorológica del Instituto Nacional de Electrificación (INDE).

Actualmente, esta institución técnico-científica se distingue por su elevado nivel de calificación, desempeñando un papel fundamental en la mejora de las operaciones del sector productivo de la República de Guatemala. Su enfoque está vinculado estrechamente a las ciencias atmosféricas, geofísicas e hidrológicas. Además, coordina servicios con el sector privado y actúa como asesor técnico del gobierno en situaciones de desastres naturales.

Asimismo, la institución planifica, diseña y lleva a cabo estudios y monitoreo sistemático mediante el uso de tecnología adecuada. Este enfoque enriquece las bases de datos y los sistemas de información geofísica, consolidándose como una referencia crucial para el país. Además, contribuye activamente a la modernización y mejora de las especificaciones en el ámbito educativo.

Ofrece servicios de vigilancia sistemática continua de la actividad volcánica y sísmica, al tiempo que gestiona datos hidrometeorológicos. Además, se encarga de mantener, reactivar y llevar a cabo la ampliación de las actividades operativas e institucionales, relacionadas con la rehabilitación y reconstrucción de estaciones o puntos de monitoreo con enfoque climático.

La sede principal se encuentra en la ciudad de Guatemala, específicamente en la 7 av. 14-57 zona 13, colonia Aurora I; frente al aeropuerto internacional La Aurora, localizado geográficamente en las coordenadas 14° 35' 11" latitud, 90° 31' 58" longitud y elevación 1502 m s.n.m.

## **1.2. Misión**

INSIVUMEH. (2023) Ser una institución técnico-científica que genera, difunde información geo-científica, a través de la recolección y el procesamiento de datos para la toma de decisiones que contribuyan al beneficio de la población. <https://insivumeh.gob.gt/?p=130>.



### **1.3. Visión**

INSIVUMEH. (2023) Ser reconocidos como una institución generadora de información geocientífica confiable, efectiva y de calidad mundial que impacte positivamente a la población. <https://insivumeh.gob.gt/?p=130>.

### **1.4. Estructura**

El INSIVUMEH es dependencia del Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda, está compuesto por la dirección y subdirección general, de la cual se desglosan cuatro unidades complementarias y cuatro departamentos esenciales.

Las unidades complementarias son las siguientes:

- Unidad de Planificación y Desarrollo Institucional.
- Unidad de Asesoría Jurídica.
- Unidad de Comunicación Social.
- Unidad de Tecnologías de la Información.

#### **1.4.1. Departamento administrativo – financiero**

Su función principal es la prestación de servicios técnico – administrativo y financiero, indispensable para desarrollar las actividades de la institución.

Se subdivide en tres áreas, y cada área se desglosa en distintas unidades:

- Sección administrativa.
  - Unidad de compras.

- Unidad de almacén.
- Unidad de logística y servicios generales.
- Unidad de mantenimiento de edificios.
- Sección financiera.
  - Unidad de contabilidad.
  - Unidad de presupuesto.
  - Unidad de tesorería.
  - Unidad de inventario.
- Sección de recursos humanos.
  - Unidad de nómina.
  - Unidad de acción de recursos humanos.
  - Unidad de información pública.

#### **1.4.2. Departamento de Investigación y Servicios Hídricos**

Su función principal es monitorear y controlar en materia hídrica del territorio nacional, buscando como objetivo mantener actualizada la base de datos hidrometeorológica para el interés nacional; con la finalidad de optimizar el uso de fuentes hídricas disponibles en el territorio nacional, fomentando su conservación.

Se subdivide en distintas secciones, las cuales son:

- Sección de Hidrología y Aplicaciones.
- Sección de Hidrogeología.
- Sección de Oceanografía.
- Sección de Calidad del Agua y Aire.

#### **1.4.3. Departamento de investigación y servicios Meteorológicos**

Es el departamento encargado del monitoreo de fenómenos atmosféricos y su impacto a nivel nacional, generando reportes, estadísticas y pronósticos meteorológicos; difundiendo toda actividad meteorológica que se desarrolle en el país.

Se subdivide en distintas secciones, las cuales son:

- Sección de Climatología y Aplicaciones.
- Sección de Meteorología Aeronáutica.
- Sección Centro Nacional de Pronósticos.

#### **1.4.4. Departamento de investigación y servicios geofísicos**

Su función principal es el estudio de los movimientos telúricos. El cual tiene como actividad principal registrar los movimientos del suelo, su origen y propagación de la onda sísmica. Es comprendida por la unidad de vulcanología, la cual tiene como objetivo principal, registrar y monitorear la actividad volcánica en el territorio nacional.

Se subdivide en distintas secciones, las cuales son:

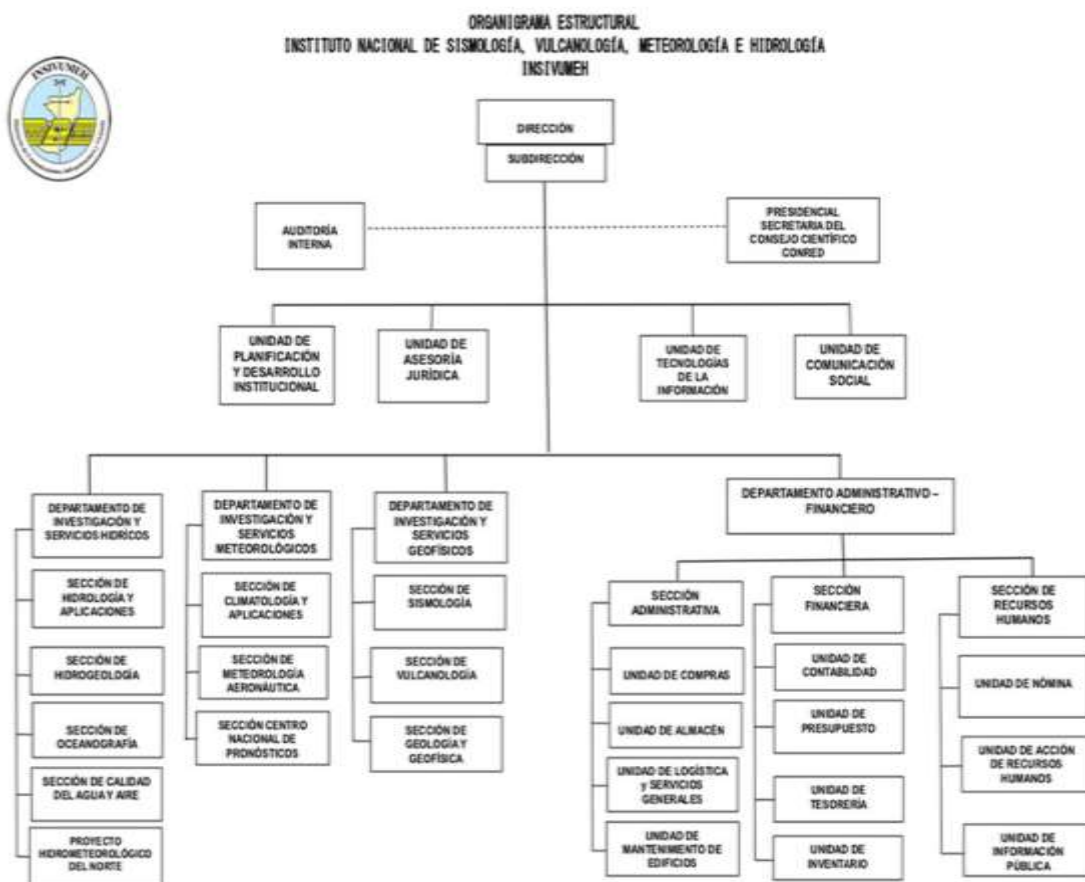
- Sección de Sismología.
- Sección de Vulcanología.
- Sección de Geología y Geofísica.

## 1.5. Organigrama

La institución muestra los departamentos que rigen los análisis de las ciencias atmosféricas, siendo estos departamentos vitales para un funcionamiento óptimo.

**Figura 1.**

*Organigrama INSIVUMEH*



*Nota.* El diagrama muestra el organigrama de INSIVUMEH. Obtenido del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. <https://insivumeh.gob.gt/?p=130>  
Consulta: 17 de enero de 2024. De dominio Público.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Descargas electroatmosféricas**

Las descargas eléctricas atmosféricas, comúnmente conocidas como descarga electroatmosféricas, son fenómenos naturales que involucran una transferencia violenta de carga positiva o negativa dentro de un campo eléctrico creado en una nube. Estas descargas pueden ocurrir de diversas formas: de nube a nube, de nube a tierra o de tierra a nube. El proceso detrás de la descarga electroatmosféricas, se produce debido al rompimiento de la rigidez dieléctrica del aire y a la conductividad inherente de la atmósfera.

Estos eventos naturales pueden tener una intensidad impresionante, a menudo, están acompañados por truenos y destellos luminosos. Las descargas electroatmosféricas son un fenómeno interesante, crucial en el estudio de la meteorología, la climatología, su comprensión es esencial para la seguridad, la protección de las personas y las infraestructuras, frente a los efectos potencialmente peligrosos que pueden desencadenar.

#### **2.1.1. Comportamiento eléctrico de la atmósfera**

Durante un día de buen tiempo, en la atmósfera terrestre, se forma normalmente un campo eléctrico permanente, con superficies equipotenciales concéntricas, su centro coincide con el de la tierra. Esto implica que el vector de intensidad del campo eléctrico es vertical en cada punto y apunta hacia el centro de la tierra, lo que sugiere la presencia de una gran carga negativa en la tierra.

Además, a medida que se aleja del centro de la tierra y se asciende en las diferentes capas de la atmósfera, el potencial eléctrico se torna más positivo, lo que resulta en un gradiente de potencial o campo eléctrico que disminuye en esa misma dirección. Esta variación en el potencial eléctrico con la altitud es de suma importancia para entender los procesos atmosféricos y los fenómenos eléctricos que ocurren en la atmósfera.

### **2.1.2. Cómo se generan las descargas electroatmosféricas**

Teóricamente la formación de una descarga electroatmosféricas se puede mencionar las siguientes:

- Teoría de Simpson: la carga eléctrica en las nubes resulta del movimiento del viento y las corrientes ascendentes que transportan vapor húmedo. Este vapor se condensa formando gotas de agua que, debido a su peso, caen. En su descenso, estas gotas encuentran corrientes ascendentes que las dividen en gotas más pequeñas. Este proceso de división provoca la liberación de aniones, los cuales se dispersan en la atmósfera y son llevados a la parte inferior de la nube, cargándola positivamente en la parte superior. La nube, al estar polarizada, genera una acumulación de carga positiva en la superficie terrestre próxima a ella, creando un gran capacitor con el dieléctrico, representado por la capa de aire entre la tierra y la nube.

Cuando el dieléctrico se rompe o pierde su propiedad aislante, se desencadena la descarga eléctrica.

- Teoría de Elster Geitel: en esta teoría, se aplica un campo eléctrico de 100 V/m a una gota de agua, lo que provoca que su superficie se polarice, siendo positiva en la parte superior y negativa en la inferior. A medida que

estas gotas se encuentran con corrientes de viento, aumenta su carga por adición. Este proceso se repite de manera continua, hasta que se acumula una carga negativa suficiente para desencadenar la descarga electroatmosférica.

- Teoría de Wilson: según esta teoría, la generación de la descarga se origina por la ruptura de las gotas de agua en una tormenta, resultando en la separación de su carga eléctrica. Esto es consecuencia de la corriente ascendente del viento y la fuerza gravitatoria de la tierra. Las gotas entran en contacto con los iones presentes en la atmósfera, incrementando la ionización y facilitando así, la formación de la trayectoria del canal para la descarga electroatmosférica.
- Teoría de Robinson y Simposon: llamada también la teoría de los cristales de hielo, resalta la importancia de la presencia de cristales de hielo en la parte superior de las nubes, al chocar la disociación de cargas, dejando el viento con carga positiva y los cristales con carga negativa, lo que da resultado a la polarización de las nubes.

### **2.1.3. Formación de propagación de una descarga electroatmosférica**

El proceso de propagación de la descarga electroatmosférica, se inicia con la formación de un canal ionizado en el aire. Esto ocurre cuando la diferencia de carga eléctrica ioniza las moléculas del aire, creando un camino conductor para que la corriente eléctrica fluya. La ionización del aire se produce a medida que la descarga electroatmosférica se acerca al suelo o a otra nube.

Una vez que el canal ionizado ha sido establecido, la corriente eléctrica atraviesa el canal en una fracción de segundo, generando el destello de luz que se conoce como una descarga electroatmosférica. Esta corriente eléctrica es extremadamente poderosa y puede calentar el aire a más de 30,000 grados Celsius, lo que da lugar a una explosión sónica que produce el trueno que se escucha.

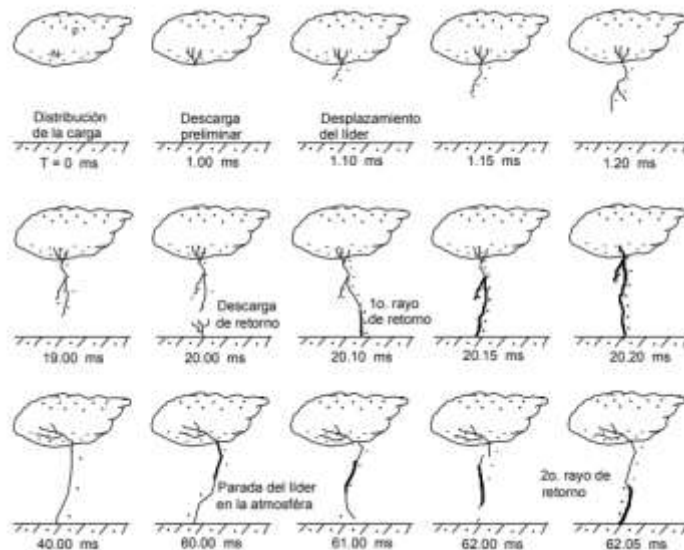
Cuando uno de los canales de descarga se acerca al suelo, se produce una acumulación de cargas positivas en el suelo, que se desplazan hacia arriba para encontrarse con el trazo o piloto de la descarga previa. Este encuentro ocurre a una altura de entre 15 a 20 metros del suelo, donde se produce la descarga electroatmosférica completo, con la descarga y el retorno.

La propagación de la descarga electroatmosférica puede tener efectos devastadores en todo lo que se interponga en su camino, incluyendo árboles, edificios o incluso personas. Es un fenómeno poderoso, potencialmente peligroso que requiere precaución y respeto.



**Figura 2.**

*Proceso de descarga atmosférica de una nube a tierra*



*Nota.* Imagen de proceso de como ocurre una descarga atmosférica. Obtenida de KINENERGY consultoría ingeniería. *Descarga atmosférica.* <https://www.kin.energy/blogs/post/sistema-de-protecci%C3%B3n-contradescargas-atmosf%C3%A9ricas>. De dominio Público.

#### **2.1.4. Polaridad de descargas electroatmosféricas**

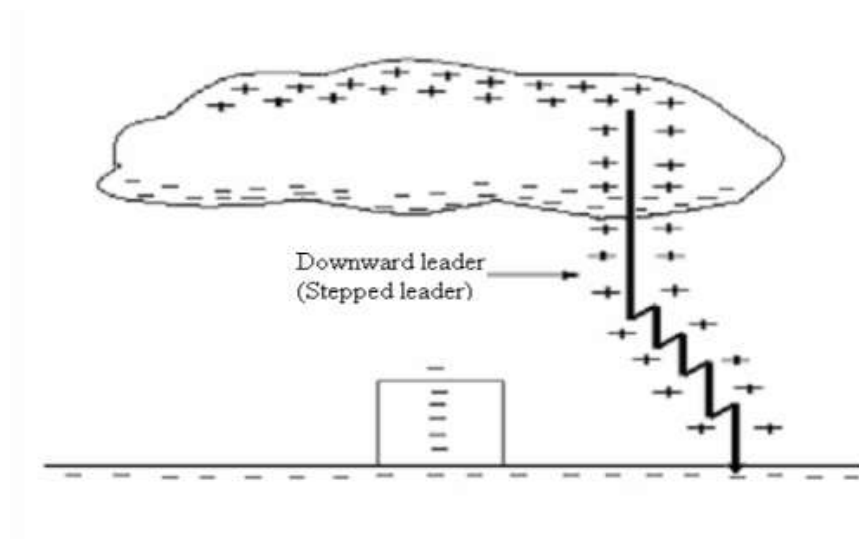
La polaridad de un rayo puede ser positiva o negativa, lo cual depende de la carga eléctrica que prevalezca en el proceso de separación de cargas en la atmósfera. Según estimaciones, alrededor del 95 % de la descarga electroatmosférica son de polaridad negativa, mientras que el restante 5 % corresponde a la descarga electroatmosférica de polaridad positiva. Es importante destacar que ambos tipos de descargas electroatmosféricas pueden ser igualmente peligrosos. Es fundamental tomar las precauciones necesarias frente a cualquier tipo de actividad eléctrica atmosférica, para garantizar la seguridad personal y de los bienes.

- Descargas electroatmosféricas positivas: las descargas electroatmosféricas de tipo singular se componen de una única descarga y se distinguen por una corriente que presenta un frente de onda con una duración de 20 a 50 microsegundos. La amplitud de esta corriente, según mediciones realizadas, puede oscilar entre 5 y 100 kiloamperios (kA), alcanzando ocasionalmente un máximo de 200 kA. Es relevante señalar que estas descargas son poco comunes y tienden a ocurrir con mayor frecuencia en zonas montañosas.

Las descargas electroatmosféricas positivas, representan una forma poco común pero peligrosa de descarga eléctrica atmosférica, debido a su mayor duración y corriente más alta, en comparación con las descargas electroatmosféricas negativas.

### Figura 3.

*Polaridad positiva*



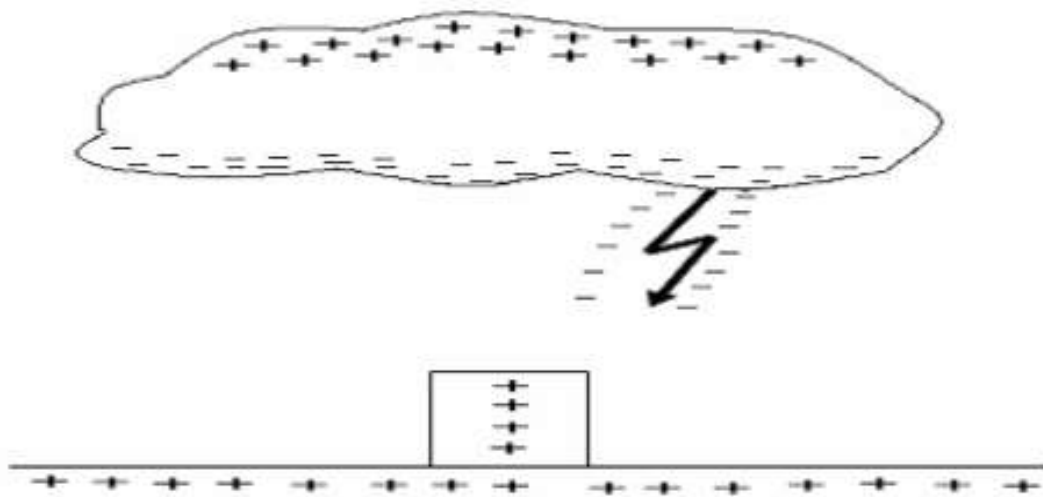
*Nota.* Polaridad de una descarga atmosférica. Fernando Hausse Chachaia, Lightning protection of thatched roofed structures, 2006. Pág. 8. *Positive Downward Leaders* [Líderes positivos a la baja], <https://core.ac.uk/download/pdf/39665606.pdf> Obtenido de Core.

- Descargas electroatmosféricas negativas: estas descargas electroatmosféricas suelen estar compuestas por varias descargas sucesivas. La primera descarga está asociada con un frente de onda de 10 a 15 microsegundos, con una amplitud de corriente más moderada en comparación con las descargas electroatmosféricas positivas. Es común que caigan en zonas llanas y climas templados.

La descarga electroatmosféricas negativos son más frecuentes que las descarga electroatmosféricas positivas, pueden presentar una menor intensidad en términos de duración y corriente eléctrica.

**Figura 4.**

*Polaridad negativa*



*Nota.* Polaridad de una descarga atmosférica. Fernando Hausse Chachaia, Lightning protection of thatched roofed structures, 2006. Pág. 7. *Negative downward leaders* [Líderes negativos a la baja], <https://core.ac.uk/download/pdf/39665606.pdf> Obtenido de Core.

### 2.1.5. Tipos de descargas electroatmosféricas

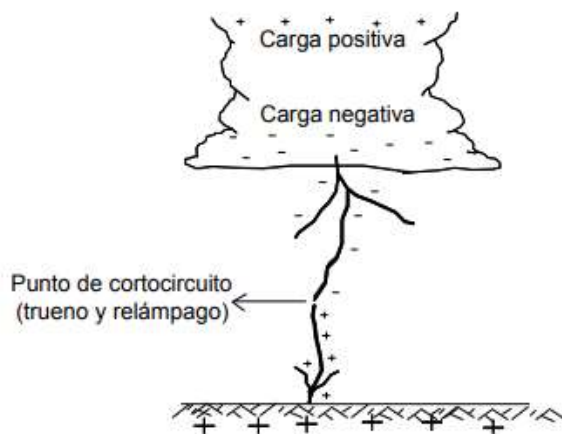
La dirección de las descargas electroatmosféricas está determinada por el avance del canal de guía, que puede seguir dos trayectorias principales. Cuando el canal avanza de la nube hacia la tierra, se denomina rayo descendente, mientras que, si ocurre lo contrario, es decir, el avance del canal de guía es de la tierra hacia la nube, se llama rayo ascendente.

Es importante destacar que las descargas electroatmosféricas pueden presentar tanto polaridad negativa como positiva.

- Descendentes negativos: Se origina con una nube con carga negativa y avanza hacia la tierra, con carga positiva, como se ve en la figura 5.

#### Figura 5.

*Característica del cortocircuito un rayo*

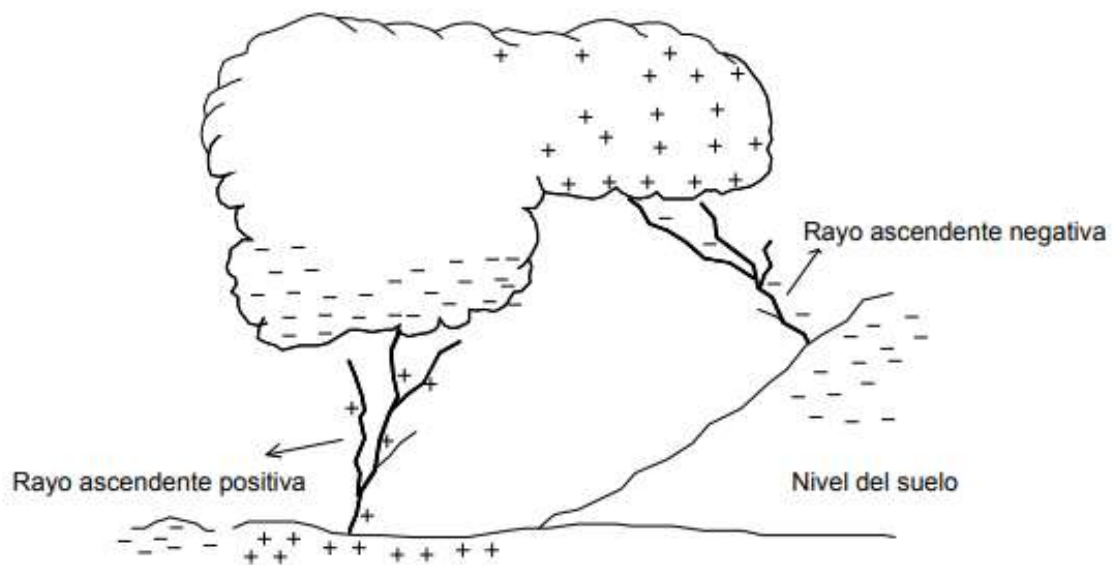


*Nota.* Corto circuito generado en una descarga atmosférica. Gilberto Tomas Laroj, actualización del mapa isocerámico de Guatemala y su influencia en el diseño de líneas de transmisión, 2004. Pág 8. Obtenido de la biblioteca de la Universidad de San Carlos de Guatemala.. [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_0518\\_EA.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0518_EA.pdf), consulta realizada el 17 de enero de 2024. De dominio público.

- Ascendente positivo: se origina sobre la tierra con carga positiva dirigiéndose a la base de la nube, la misma se presenta en terrenos de mucha conductividad y humedad; su corriente oscila en el rango de 1 kA a 400 kA.
- Ascendente negativo: Este rayo se origina sobre la tierra con carga negativa, se dirige a la parte superior de la nube con carga positiva. Se produce, en los picos altos de las montañas o volcanes Figura 6.

**Figura 6.**

*Descargas electroatmosféricas*



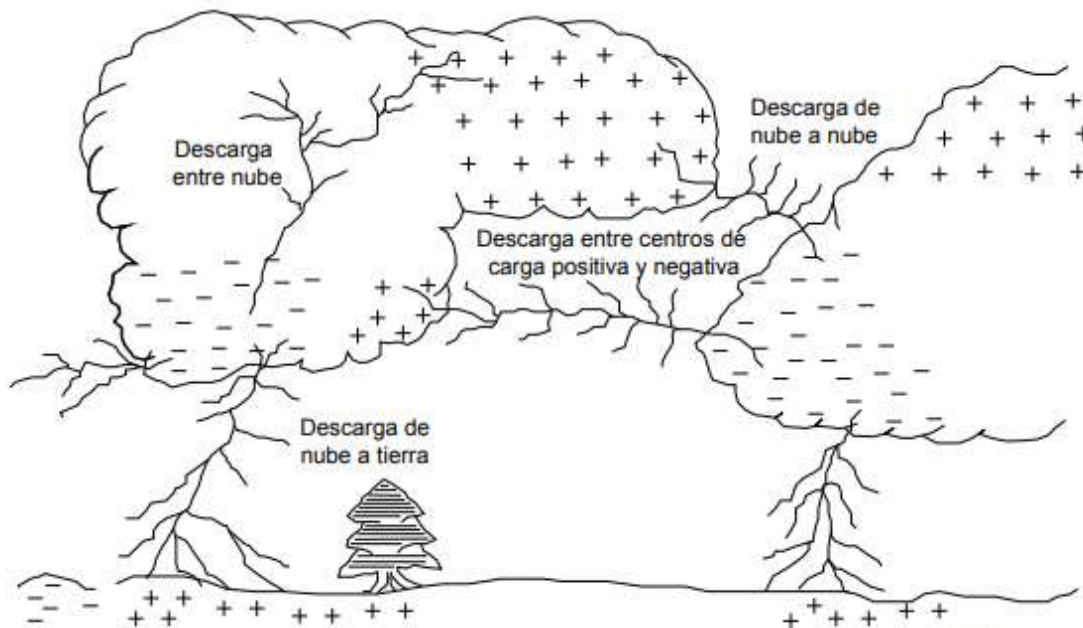
*Nota.*Tipos descarga atmosférica. Gilberto Tomas Laroj, actualización del mapa isoceráunico de guatemala y su influencia en el diseño de líneas de transmisión, 2004. Pág 15. Obtenido de la biblioteca de la Universidad de San Carlos de Guatemala. [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_0518\\_EA.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0518_EA.pdf), consulta: 17 de enero de 2024.

De dominio Público.

- Rayo entre nubes (rayo intra-nube):  
Se generan entre centros de cargas internos de los cumulonimbos. Estas descargas tienen una intensidad inferior a las de las descargas electroatmosféricas nube y Tierra, pero su frecuencia es bastante superior.
- Descarga electroatmosféricas nube-nube (rayo inter-nube):  
Se producen entre centros de nubes con cargas opuestas que pueden estar separadas hasta 20 km; se les denominan relámpagos.

**Figura 7.**

*Distintas formas de descargas por descargas electroatmosféricas*



*Nota.* Distintas Formas de descarga por descargas. Gilberto Tomas Laroj, actualización del mapa isocerámico de Guatemala y su influencia en el diseño de líneas de transmisión, 2004. Pág 17. Obtenido de la biblioteca de la Universidad de San Carlos de Guatemala. [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_0518\\_EA.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0518_EA.pdf), consulta: 17 de enero de 2024.

De dominio Público.

#### **2.1.6. Frecuencias de las descargas de descargas electroatmosféricas**

La actividad de descargas electroatmosféricas solía medirse en términos de los días de tormenta para cada región. Se consideraba aquel en el cual los observadores meteorológicos escuchaban al menos un trueno.

#### **2.1.7. Densidad de descargas electroatmosféricas en la tierra**

A finales de la década de 1970, el número de descargas electroatmosféricas, que impactaban un kilómetro cuadrado de tierra en un año, solía obtenerse mediante contadores de descarga electroatmosféricas. Sin embargo, en la actualidad, esta cifra se determina con mayor precisión gracias a los sistemas de localización de descarga electroatmosféricas, que utilizan métodos como la radiogoniometría o la técnica del tiempo de llegada.

Es importante tener en cuenta que la sensibilidad de estos sistemas no es del cien por ciento y puede variar en función del entorno de los detectores. Esto significa que los valores exactos de la densidad de descargas electroatmosféricas en la Tierra, podrían ser incluso mayores a los obtenidos por estos sistemas.

Además, la densidad de descargas electroatmosféricas en la tierra puede variar significativamente de una región geográfica a otra, e incluso dentro de la misma región. En general, los estudios de la densidad de descargas electroatmosféricas en la tierra, suelen encontrarse en un rango que va desde al menos un rayo por kilómetro cuadrado por año, hasta alrededor de 10 descargas electroatmosféricas por kilómetro cuadrado por año. Estos valores proporcionan información valiosa para comprender la distribución de la actividad de descargas

electroatmosféricas en diferentes áreas, contribuyen al análisis y la prevención de fenómenos meteorológicos relacionados con descargas electroatmosféricas.

#### **2.1.8. Actividad total de descargas electroatmosféricas**

Se ha realizado un análisis de la densidad total de descargas electroatmosféricas en diversas regiones del mundo mediante estudios de datos recopilados por contadores de descarga electroatmosféricas específicamente diseñados en 14 países. Sus investigaciones revelaron una tendencia evidente en la actividad de descargas electroatmosféricas, mostrando que esta alcanza su máximo en las zonas ecuatoriales y disminuye a medida que aumenta la latitud.

En resumen, se expresan a través de una ecuación que, representa la relación entre la densidad total de descargas electroatmosféricas y la latitud en diferentes regiones del mundo. Estos hallazgos contribuyen a una mejor comprensión de la distribución de la actividad de descargas electroatmosféricas en el planeta, aportan información valiosa para la investigación en el campo de la meteorología y la climatología. Resumiendo, sus resultados a través de la ecuación:

$$N = e (3,7 - 0,07\lambda) \text{ km}^2 / \text{año} \quad (6.1)$$
 donde  $\lambda$  es la magnitud de la latitud en grados.

#### **2.2. Redes de detección de descargas electroatmosféricas**

Es un sistema diseñado para identificar y registrar la presencia de descargas atmosféricas en una determinada área geográfica.



### **2.2.1. Detector de descargas electroatmosféricas**

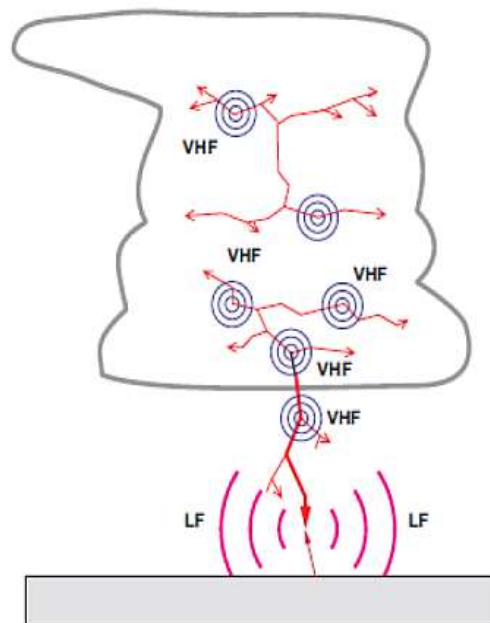
Un detector de descargas eléctricas atmosféricas es un dispositivo diseñado para detectar los campos electromagnéticos, generados por las descargas eléctricas en la atmósfera. Algunos de estos detectores tienen la capacidad de medir la intensidad, la frecuencia y la dirección de la descarga electroatmosférica. Cuando dos o más detectores detectan el mismo rayo, es posible utilizar la técnica de triangulación para determinar la ubicación precisa donde ha caído el rayo.

La triangulación es una técnica que se basa en la medición de la diferencia de tiempo que tarda la señal del rayo en llegar a cada uno de los detectores. Con esta información, se puede calcular la distancia desde cada detector hasta el punto de impacto del rayo y, mediante la intersección de estas líneas de distancia, obtener la ubicación exacta donde se ha producido la descarga eléctrica.

Esta información resulta invaluable para los meteorólogos, esto permite realizar un seguimiento de las tormentas y prever su comportamiento con mayor precisión. Los datos recopilados por los detectores de descargas eléctricas atmosféricas son de gran utilidad para comprender, estudiar estos fenómenos naturales, a su vez, contribuyen a mejorar la seguridad, protección de las personas y las infraestructuras ante la actividad eléctrica atmosférica.

**Figura 8.**

*Espectro radioeléctrico en una descarga electroatmosférica*



*Nota.* Espectro de onda generado en una descarga atmosférica. Obtenido de <https://www.in-pocasi.cz/clanky/teorie/detekce-blesku-18.7.2014/>, consulta: 17 de enero de 2024. De dominio Público.

### **2.2.2. Red de detección de descargas electroatmosféricas**

Un sistema de detectores de descargas eléctricas atmosféricas está compuesto por dispositivos individuales, que tienen la capacidad de detectar las descargas eléctricas producidas por tormentas eléctricas, dentro de su área de cobertura. Los datos recopilados por cada detector se envían a un sistema central de almacenamiento y procesamiento para su posterior análisis.

Para lograr una cobertura más eficiente del área, es importante que los límites de detección de los dispositivos individuales se superpongan con los

límites de los detectores adyacentes. Esto da lugar a la creación de una malla o red de detección de descargas eléctricas atmosféricas, que garantiza una mayor eficacia en la captura de información sobre estos eventos naturales.

La implementación de esta malla de detección permite un monitoreo más preciso, detallado de las tormentas eléctricas en la región, lo que proporciona información valiosa para la investigación y el análisis de estos fenómenos climáticos.

### **2.2.3. Métodos de detección de descargas eléctricas atmosféricas**

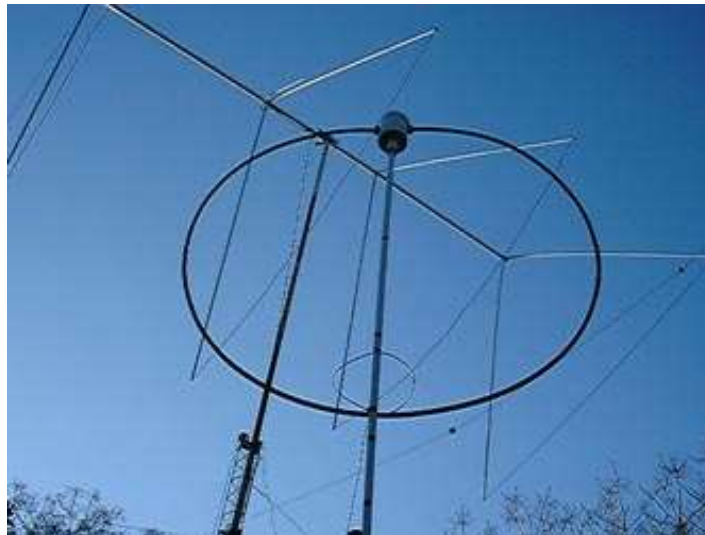
Las descargas electroatmosféricas abarcan desde descarga electroatmosféricas intra-nube de baja corriente, que operan en la banda VHF pueden tener una extensión de hasta un kilómetro, hasta descargas electroatmosféricas de gran envergadura que conectan entre la tierra y las nubes, conocidos como descargas de retorno RS, con corrientes de varios cientos de kiloamperios (KA) con longitudes superiores a 10 km. Dado que estos eventos no pueden ser detectados mediante una única técnica, se han desarrollado diversos sistemas de detección de descargas electroatmosféricas en operaciones en distintas partes del mundo.

Las principales tecnologías utilizadas en estos sistemas operan en las bandas LF (baja frecuencia), VLF (muy baja frecuencia) y VHF (alta frecuencia). Cada una de estas tecnologías tiene sus ventajas y limitaciones, lo que ha llevado a su implementación en combinación para obtener una cobertura más completa y precisa en la detección de los diferentes tipos de descargas electroatmosféricas.

- Método de Radiogoniometría (MDF): usando las bandas VLF y LF, determina la posición de las descargas por vía de una triangulación usando al menos dos sensores, la corriente pico puede ser estimada desde la medida del campo pico. Aunque este método tiene un buen estimado de las descargas electroatmosféricas nube-tierra, en ciertas condiciones geométricas entre los sensores y las descargas producen resultados pobres.

**Figura 9.**

*Antena de cuadro*



*Nota.* Cuadro de antena de detección de descargas atmosféricas. Obtenido de <https://www.gsl.net/lw3dfa/antenacuadro.htm>, consulta: 17 de enero de 2024. De dominio Público.

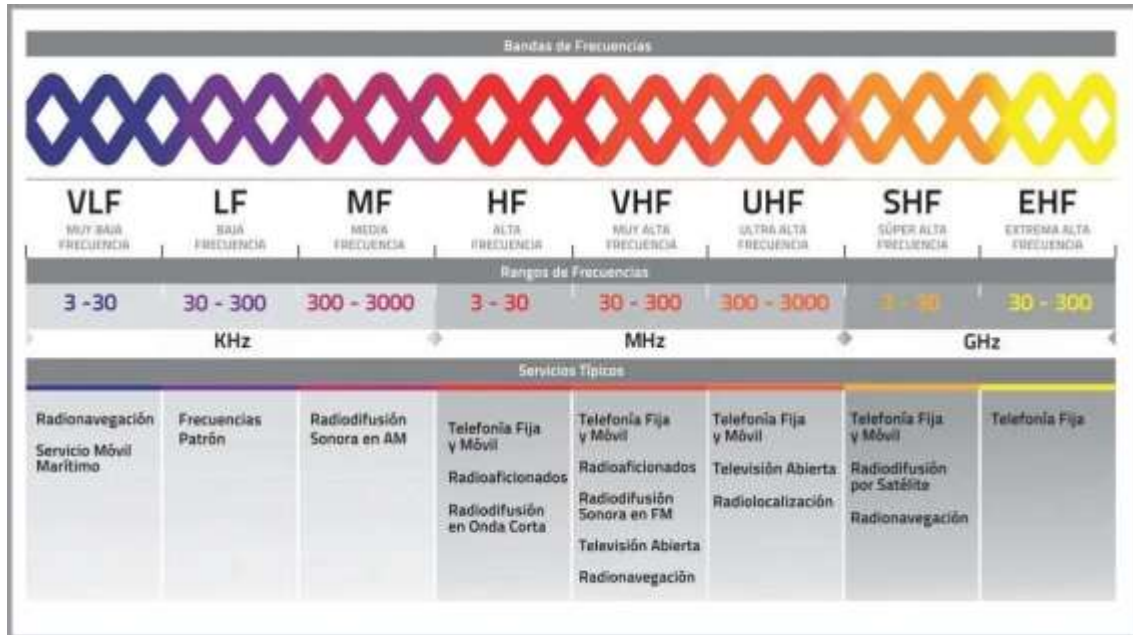
- TOA: emplea la banda VHF se fundamenta en la medición del tiempo de llegada, de un pulso de radio en varias estaciones sincronizadas. No obstante, esta técnica presenta la limitación de generar una mayor incertidumbre, al localizar un rayo cuando se utilizan menos de tres estaciones en una red. Sin embargo, al disponer las antenas de manera

adecuada, estas pueden ofrecer ubicaciones precisas a distancias considerablemente extensas, minimizando así los posibles errores.

- LPATS, el cual es un receptor TOA de banda ancha que es adecuado para la detección de descargas electroatmosféricas a mediana y largas distancias, a través del método hiperbólico.
- SAFIR, consiste en una red de estaciones que combinan la interferometría VHF con un sensor LF para la ubicación y caracterización de la actividad total de descargas electroatmosféricas. El arreglo interferométrico SAFARI usa medidas de fase diferencial en ondas electromagnéticas de descargas electroatmosféricas para buscar la dirección a grandes distancias. El sensor de discriminación LF de SAFARI es una antena de banda ancha que identifica las descargas electroatmosféricas nube-tierra.

**Figura 10.**

*Espectro radioeléctrico*



*Nota.* Banda de Frecuencia y los servicios que los usan. Obtenido de <https://tpempresas.com/introduccion-a-las-comunicaciones-inalambricas-ii>, consulta: 17 de enero de 2024. De dominio Público.

### **3. MARCO METODOLÓGICO**

#### **3.1. Georreferenciación**

Para obtener información precisa sobre la ubicación de las estaciones, es necesario utilizar equipos de recepción GPS especializados. Estos dispositivos reciben señales directas de la constelación GPS, lo que garantiza una localización más precisa y confiable. Por ningún motivo se debe recurrir al uso de equipos celulares para determinar la ubicación de las estaciones, con estos dispositivos presentan una incertidumbre considerable que podrían afectar la precisión en la ubicación de eventos.

La utilización de equipos de recepción GPS dedicados asegura la obtención de datos geospaciales confiables, lo cual es esencial para el correcto funcionamiento de la red de estaciones y la precisión en la detección de eventos atmosféricos, como descargas eléctricas o fenómenos meteorológicos. Garantizar una ubicación exacta, precisa es fundamental para el análisis, la interpretación adecuada de los datos recopilados, así como para facilitar la colaboración y el intercambio de información con otras instituciones o sistemas de monitoreo.

**Figura 11.**

*Servicio técnico GPS*



*Nota.* Servicio básico de GPS para un usuario. Obtenido de <https://comofuncionaque.com/como-funciona-el-gps/>, consulta: 17 de enero de 2024. De dominio Público.

### **3.2. Localización**

Al realizar los estudios de todos los puntos propuestos, se llevó a cabo un análisis exhaustivo para garantizar que cumplan con las condiciones de instalación requeridas. Se evaluaron los puntos en función del riesgo de descargas atmosféricas, la accesibilidad para el mantenimiento y la instalación inicial del equipo, evitando áreas con posibles fuentes de interferencia electromagnética que podrían afectar la precisión de las mediciones. Además, se verificó que existiera un acceso confiable al suministro eléctrico y a internet, así como medidas de seguridad adecuadas. Se consideró también la distribución geográfica para asegurar una cobertura efectiva. Estos criterios fueron aceptados como parte del proceso.



**Tabla 1.**

*Localización*

	NOMBRE DE ESTACIÓN	Nombre	DEPARTAMEN TO	REFEERENCIA DE INSTALACIÓN	LONGITU D	ALTITU D
1	INSIVUMEH GT	Guatemala	Guatemala	INSIVUMEH GT	14.58770	-90.526
2	PUERTO BARRIOS GT	Puerto Barrios	Izabal	INSIVUMEH PUERTO BARRIOS	15.73016	-88.584
3	SANTA ELENA	Santa Elena	Peten	INSIVUMEH PETEN	16.91944	-89.884
4	QUETZALTENA NGO	Quetzaltenango	Quetzaltenango	CONRED QUETZALTENANGO	14.85877	-91.509
5	ESCUINTLA GT	Escuintla	Escuintla	CONRED ESCUINTLA GT	14.29457	-90.795

*Nota.* Ubicación de las estaciones, elaboración propia, realizado con Excel

**Figura 12.**

*Localización*



*Nora.* Localización geográfica en mapa de cada estación. Elaboración propia, realizado con QGIS 3.16.4.

### **3.3. Delimitación del campo de estudio**

Las recomendaciones detalladas a continuación proporcionan una guía para la instalación adecuada de estaciones, teniendo en cuenta diversos factores que podrían influir en la calidad de las mediciones.

#### **3.3.1. Condiciones de instalación**

Recomendaciones para la instalación de la estación:

- Asegurarse de instalar la estación sobre una superficie plana en relación con el plano horizontal.
- Garantizar que el terreno donde se instale esté alejado de objetos que puedan generar campos electromagnéticos, como aires acondicionados, motores eléctricos, generadores, torres de comunicación y radios AM.
- Verificar que los sensores estén instalados sobre una estructura sólida y fabricados con materiales resistentes a los elementos.
- Mantener el entorno de la estación imperturbable durante su funcionamiento para evitar interferencias en las mediciones.
- Colocar la estación en un lugar seguro para reducir el riesgo de robos, vandalismo o ingreso de personal no autorizado.
- Garantizar la operatividad continua de la estación para evitar pérdida de datos y mantener un sistema de monitoreo ininterrumpido.
- Instalar una varilla de puesta a tierra para proteger el equipo de posibles corrientes de fuga, optimizar la calidad de la señal eléctrica y reducir el ruido electromagnético.

La observancia de estas recomendaciones es esencial para garantizar el adecuado funcionamiento, precisión y durabilidad de la estación de monitoreo.

Al seguir estos pasos, se asegura la obtención de datos confiables, se optimiza la eficacia en la detección, el análisis de eventos atmosféricos y climáticos.

Además, al conectarse a la estación a través del programa Tera Term, se podrá visualizar si está siendo afectada por ruidos ajenos a descargas electroatmosféricas. Esta funcionalidad es de suma importancia, permitiendo detectar posibles interferencias o perturbaciones en la señal que podrían afectar la precisión de los datos recopilados. La capacidad de identificar y evaluar estas situaciones garantiza la fiabilidad de la información proporcionada por la estación, lo que resulta fundamental para realizar análisis precisos, confiables de las condiciones meteorológicas y eléctricas.

### Figura 13.

*Verificación de ruido mediante el comando status*

```
status
[appLog.c:1426] CONFIG VALID    Yes - config was valid at startup
[appLog.c:1431] GPS LOCK       Yes
[appLog.c:1436] SERVER CONNECT Yes
[appLog.c:1443] FPGA LOADED    Yes
[appLog.c:1448] STROKES NOISY   No Cnt 0 <MAX STROKES/SEC 25>
[appLog.c:1454] UHF CARD FAULT  0
[appLog.c:1456] NOISE DETECT: NOISY=DISABLE AFTER 3 SECS; QUIET=ENABLE AFTER 10 SECS
```

*Nota.* Mensaje de estado de estación de detección de descargas atmosféricas. Elaboración propia.

### 3.4. Recursos disponibles

Para garantizar el funcionamiento adecuado de la estación, se requiere disponer de suministro eléctrico, conexión a Internet y una adecuada puesta a tierra.

#### **3.4.1. Transmisión de datos**

El sistema de comunicación se refiere a la solución implementada para transmitir los datos, medidos hacia un operador del sistema u observador remoto. En el caso de esta estación, se emplea un sistema de comunicación por línea dedicada. La configuración de la estación incluye la programación de la IP, que puede ser estática o dinámica, dependiendo del servicio de internet contratado en el lugar de instalación.

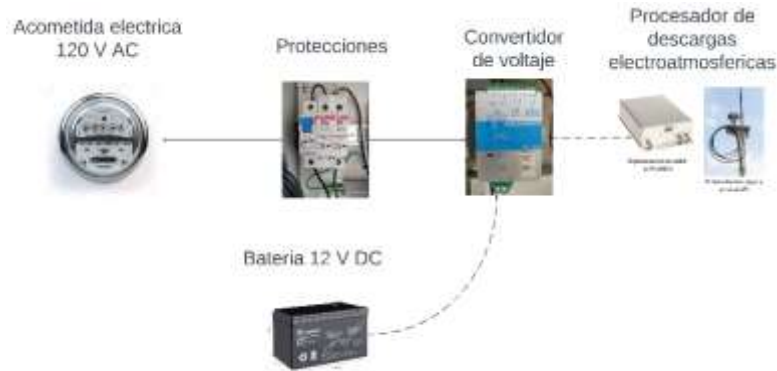
El tiempo de transmisión de los datos es de 1 minuto, lo cual es fundamental para generar alertas de nubes de tormenta y mantener actualizada la información de manera constante. La eficacia de este servicio radica en su capacidad para proporcionar alertas, permitirá tomar acciones preventivas ante situaciones climáticas adversas.

#### **3.4.2. Suministro eléctrico**

La estación necesita un suministro eléctrico de 120 voltios. Teniendo una batería acido- plomo sellada (12 Vcc y 7 Ah) con un inversor de voltaje (12 Vcc a 110 Vca), utilizado en caso de perder suministro eléctrico. Consumiendo un máximo de amperaje de 747 mA.

**Figura 14.**

*Diagrama eléctrico*



*Nota.* Diagramas del suministro eléctrico de una estación. Elaboración propia, realizado con Paint.

Estas estaciones se ubican en áreas densamente pobladas y con un suministro eléctrico altamente confiable para los consumidores. Sin embargo, es importante tener en cuenta que en la caja NEMA de la estación solo se dispone de una batería. Por lo tanto, resulta esencial calcular el tiempo de autonomía que la estación podrá mantener en caso de quedarse sin suministro eléctrico. Este cálculo permitirá garantizar la continuidad y confiabilidad de la operación de la estación, asegurando así la disponibilidad de datos.

Para el cálculo de tiempo que podrá suministrar la batería energía a la estación se aplican las siguientes formulas:

$$Horas = \frac{W_{Bateria}}{W_{consumida}}$$

$$W_B = V_{nominal_{bat}} * I_{Ah_{bat}}$$

$$W_c = V_{nominal_{bat}} * I_{consumida}$$

$$W_B = 12 V * 7Ah = 84Wh$$

$$W_c = 12V * 747mA = 8.964W$$

$$Horas = \frac{84 Wh}{8.964 W} = 9.375 \approx 9.38horas$$

Quedado como resultado un suministro eléctrico de 9 hora 22 minutos y 48 segundos aproximadamente.

**Tabla 2.**

*Consumo*

Descripción	Valor
Voltaje nominal	12V
Corriente batería en una hora	7Ah
Corriente Consumida	747 mA

*Nota.* Valores eléctricos de una estación de detección de descargas atmosféricas. Elaboración propia, realizado con Excel

### 3.4.3. Puesta a tierra

Es una parte fundamental del sistema eléctrico. Disipa al terreno las corrientes de defecto, frecuencias industriales y descargas atmosféricas. Estas garantizan la seguridad proporcionando una ruta segura a las corrientes y evitando que estas causen algún daño a personal o al equipo. Mejoran la calidad de las señales minimizando el ruido electromagnético.

Se pudo observar al realizar las instalaciones de las estaciones que en los lugares que no se poseía una puesta tierra:

- Se debía reducir la sensibilidad de la estación.
- Se activaba la alarma de *STROKES NOICY*.
- Sistema de TOA no aceptaba los eventos que la estación enviaba,

Estos problemas fueron resueltos al mejorar o instalar la puesta a tierra. En los mantenimientos se tiene como punto la verificación del estado de tanto visual como por medición con equipo de las barrillas de puesta a tierra de cada estación.

La integridad de la tierra física fue sometida a pruebas exhaustivas mediante el empleo de un medidor de tierra, el *EARTH RESISTANCE TESTER* 382252. Este dispositivo, permitió evaluar la eficacia del sistema de conexión a tierra. Los resultados obtenidos revelaron valores que cumplen con los estándares establecidos por la norma IEEE 80-2013, confirmando así la idoneidad de la infraestructura de tierra física implementada.

**Figura 15.**

*Medición de puesta a tierra estación INSIVUMEH GT*



*Nota.* Medición de la puesta a tierra de la estación INSIVUMEH GT. Elaboración propia, realizado con Paint.

### **3.5. Herramienta**

Incluye una variedad de equipos especializados, como instrumentos de medición, dispositivos de comunicación y herramientas de mano necesarias para llevar a cabo las tareas relacionadas. Estos recursos son fundamentales para garantizar la eficacia y la seguridad durante la ejecución de las actividades.

#### **3.5.1. Recursos materiales**

Para la ejecución del presente proyecto, se obtuvo acceso a las instalaciones, recursos, materiales y equipos del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH) y la Agencia



Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID). Estos elementos clave incluyen:

- Vehículos automotores
- Materiales de construcción
- Viáticos
- Contactos
- Acceso a lugares

Multímetro	(Q 7,500.00)
Viáticos	(Q 6,090.00)
Materiales de construcción	(Q 300.00)
Herramienta	(Q 800.00)
Estaciones	<u>(Q 934,427.43)</u>
Total:	(Q 949,117.43)

### **3.5.2. Condiciones generales para la instalación y operación de una estación**

- La estación debe estar geo referenciada.
- La estación debe acoplarse a las condiciones establecida en relación con el medio de transmisión establecida en el manual del fabricante.
- La instalación, emplazamiento y exposición de sensores deben cumplir con el manual del fabricante.
- Capacidad máx.: 10A/250VAC, 10A/30VDC
- Corriente máx.: 10A (NO), 5A (NC)
- Tiempo de acción: 10 ms / 5 ms



## **4. CONDICIONES TÉCNICAS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED DE DETECCIÓN DE DESCARGAS ELECTROATMOSFÉRICAS**

### **4.1. Estructura de red de detección de descargas electroatmosféricas**

Se presenta una explicación detallada del diseño que compone una estación, así como una descripción del software utilizado para llevar a cabo la adquisición, procesamiento y presentación de datos.

El diseño de la estación se aborda en términos de sus componentes esenciales, su funcionamiento, los criterios considerados para garantizar su óptimo rendimiento en la recopilación de información. Además, se discute la importancia de factores como la ubicación, el tipo de sensores utilizados, la infraestructura necesaria para asegurar la precisión y confiabilidad de los datos obtenidos.

En cuanto al software, se describen las características, capacidades del programa empleado para gestionar los datos recopilados por la estación, su procesamiento, análisis para su posterior presentación de forma clara y comprensible para los usuarios. Se destacan las herramientas, funciones que facilitan la interpretación de los resultados para la generación de informes útiles en el monitoreo y estudio de fenómenos atmosféricos.

En conjunto, se brinda una visión integral del diseño, funcionamiento de la estación, el software asociado, permitiendo a los lectores comprender su importancia en la obtención, análisis de datos meteorológicos, así como su

relevancia en la toma de decisiones informadas y oportunas frente a eventos climáticos adversos.

**Figura 16.**

*Adelsystem CBI 123A*



*Nota.* Componentes internos de una estación de detección de descargas electroatmosféricas. Elaboración propia, realizado con Paint.

## **4.2. Componentes de una estación de detección de descargas electroatmosféricas**

Una estación de descargas electroatmosféricas capta los campos electromagnéticos que se generan cuando se rompe la permitividad eléctrica de la atmosfera, utilizando antenas especializadas y sistemas de protección eléctricos.

### **4.2.1. Antena**

El sistema de antenas utilizado por la estación está compuesto por dos tipos: una antena GPS activa, que desempeña un papel fundamental como referencia de tiempo con una antena de detección de descargas eléctricas. Y una antena de golpes. Ambas antenas juegan un rol crucial en el funcionamiento y precisión del sistema. Puede observarse el esquema de estas antenas en la Figura 18.

#### **4.2.1.1. Antena de detección de golpes**

La antena de detección de descargas eléctricas, que se especializa en la recepción de los campos electromagnéticos generados por la descarga electroatmosféricas en el rango VHF y LF. Estas señales viajan a través de la superficie terrestre a la velocidad de la luz, el tiempo de llegada de estas señales a diversas estaciones distribuidas en el territorio nacional es crucial para la ubicación precisa de la descarga electroatmosférica.

La información recopilada por esta antena es esencial para el sistema de detección, permitiendo localizar con precisión la ubicación de las descargas

electroatmosféricas. Que contribuyendo al monitoreo y análisis de la actividad eléctrica atmosférica.

Las antenas omnidireccionales VHF (*Very High Frequency*), son específicamente diseñadas para trabajar en el rango de frecuencias VHF, que generalmente abarca de 30 MHz a 300 MHz. Estas antenas son utilizadas en una variedad de aplicaciones que requieren comunicaciones de radio en estas frecuencias, como radioaficionados, servicios marítimos, servicios de emergencia, sistemas de radiocomunicación móvil, detección de descargas electroatmosféricas y más.

Algunas características y consideraciones clave de las antenas omnidireccionales VHF incluyen:

- **Diseño omnidireccional:** Como se mencionó anteriormente, las antenas omnidireccionales emiten y reciben señales en todas las direcciones horizontales, proporcionando una cobertura de 360 grados. Esto es beneficioso en situaciones donde se necesita comunicación en diversas direcciones sin tener que apuntar la antena.
- **Longitud de onda VHF:** Dado que las frecuencias VHF tienen longitudes de onda más largas en comparación con frecuencias más altas (por ejemplo, UHF), las antenas VHF son físicamente más grandes. La longitud de la antena está directamente relacionada con la frecuencia de operación.
- **Montaje en mástil:** Estas antenas a menudo se montan en mástiles o torres para elevarlas y maximizar su alcance. La altura de montaje puede afectar significativamente el rendimiento de la antena.

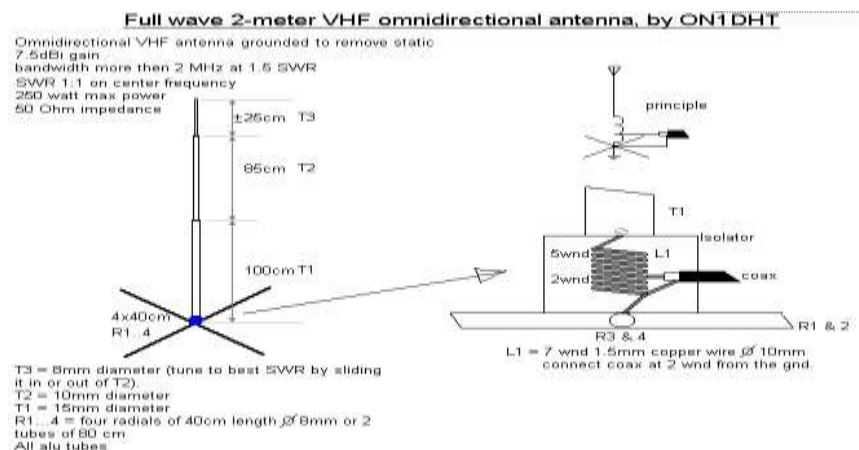
- **Ganancia y eficiencia:** Las antenas omnidireccionales VHF generalmente tienen ganancias moderadas, se diseñan para ofrecer eficiencia en la transmisión y recepción de señales en el rango VHF.
- **Conectores:** Las antenas VHF suelen tener conectores estándar, como conectores de tipo N o conectores tipo PL-259/SO-239, que son comunes en aplicaciones de radio VHF.

La estructura interna de la antena utilizada en la red está salvaguardada por una patente y derechos de propiedad intelectual. Además, existe un acuerdo en curso con la organización donante que refuerza esta protección.

La estructura de la antena guarda una fuerte similitud con la representada en la Figura 17. Aunque no es posible obtener detalles precisos sobre el número exacto de vueltas o las dimensiones internas de cada componente, se puede observar una cierta semejanza.

**Figura 17.**

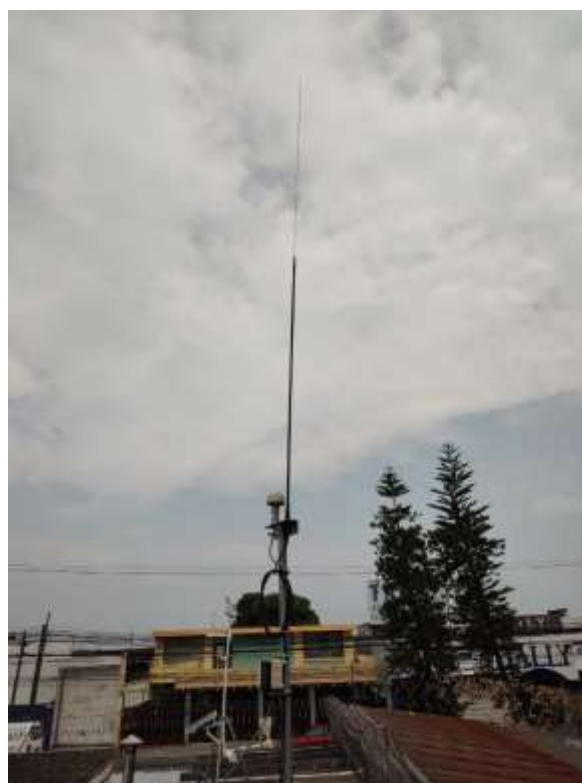
*Antena detección de golpes*



*Nota.* Construcción similar de una antena VHF y LF. Obtenido de <https://www.gsl.net/w5taz/projects.htm>, consulta: 17 de enero de 2024. De dominio Público.

**Figura 18.**

*Antena detección de golpes física*



*Nota.* El mástil, la antena GPS y la antena de golpe son componentes fundamentales de una estación de detección de descargas electroatmosféricas. Elaboración propia



#### 4.2.1.2. Antena GPS

Las antenas GPS *Trimble Bullet III*, construidas en domo totalmente de plástico resistente a la corrosión a golpes, vibraciones, temperaturas extremas, lluvia, sol y nieve.

**Figura 19.**

*Trimble bullet III*



*Nota.* Antena GPS Trimble Bullet III. Obtenido de <https://www.microtron.be/media/b1fe41f6fd49582f7e886fd93eb6adba/bullet-iii-gps-antenna.jpg>, consulta: 17 de enero de 2024. De dominio Público.

Características:

- Carcasa resistente a la intemperie y entornos marinos.
- Filtrado para entornos hostiles de interferencia de RF.

- Probado extra resistente, confiable.
- Cumple con RoHS-II.
- Diseñado para soportar la exposición a golpes, vibraciones, temperaturas extremas, lluvia, nieve y luz solar.
- La antena Bullet III para usar con hasta 75 pies de cable RG-59 para flexibilidad y facilidad de instalación.
- Capacidad de supervivencia comprobada en entornos difíciles e implacables.
- Montaje en casquillo roscado de 1"-14" o tubo roscado de 3/4".

#### Características técnicas:

- +5 V DC ( $\pm 10\%$ ).
- Consumo máximo 30 mA.
- Ganancia 35 dB  $\pm$  3 dB.
- Impedancia 50  $\Omega$ .
- Frecuencia 1575.42 MHz  $\pm$  1.023 MHz.
- Polarización circular.
- VSWR 2.0 máximo.
- Ratio axial 90°: 4.0 dB maximum; 10°: 6 dB máximo.
- Ruido 3.3 dB máximo (25 °C  $\pm$  5 °C).
- Ancho del paso de banda 50 MHz.

En el caso de la polarización circular en antenas, la señal se transmite en planos horizontales y verticales con un desplazamiento de fase de 90 grados, lo que se asemeja a la forma de un sacacorchos. Esta peculiaridad de la polarización circular es fundamental en aplicaciones FPV, ayudando a mitigar los efectos de la interferencia, las pérdidas de señal, proporcionando una mejor recepción y una transmisión más confiable en entornos desafiantes.

#### **4.2.2. Protección de línea, distribución y respaldo del sistema de UPS**

Es un UPS DC monofásica, con potencia de 36 W. Posee dos salidas una de alimentación y otra para carga de batería. Es el sistema encargado de mantener la autonomía de la estación a la hora de la suspensión del suministro eléctrico, soporta el pico de corriente hasta dos veces  $I_n$  de forma permanente y tres veces  $I_n$  durante 4 segundos.

##### **4.2.2.1. Características técnicas**

- Entrada: monofásica 115 – 277 V AC.
- Carga de salida: fuente de alimentación de 12 V CC.
- Salida Batería: cargando 12 V DC.
- Adecuado para los siguientes tipos de batería: ácido de plomo abierto, sellado de plomo ácido, plomo gel y ni-cd diagnóstico del estado de la batería. Curva de carga, prueba de duración de la batería de voltaje y corriente constantes función (cuidado de la batería) tecnología de conmutación, voltaje de salida 10-14.4 (17Vdc para Ni-Cd).
- Tres niveles de carga: Boost, Trickle y Recovery.
- Protegido contra cortocircuito y polaridad invertida.
- Salida de señal (sin contacto) para descargados o dañados baterías.
- Salida de señal (sin contacto) para red o Back-UP.
- Grado de protección IP20 - Carril DIN; Ahorro de espacio.

**Figura 20.**

*Adelsystem CBI 123A*



*Nota.* Cargador de baterrias monofásico. Elaboración propia.

**Figura 21.**

*Batería ácido-plomo*



*Nota.* Datalogger o procesador de señal LPS-200U. Obtenido de <https://www.steren.com.gt/bateria-sellada-de-acido-plomo-12-vcc-12-ah.html>, consulta: 19 de febrero de 2024. De dominio Público.

#### 4.2.3. Procesador de señal (LPS-200U)

Es el procesador del equipo marcha TOA LIGHTNING, procesa señales doble banda LF/VHF, captando señales de descargas electroatmosféricas de nube a tierra y de nube a nube simultáneamente. Al utilizar el receptor de banda ancha de alta sensibilidad bajo ruido, filtros y ecualizadores digitales, junto con la referencia de tiempo GPS, el sensor puede caracterizar y categorizar cada rayo.

Este sistema basado en el tiempo de llegada, el tiempo es una parte importante del receptor. Utilizando la sincronización GPS comercial como referencia. El sensor utiliza una fuente de sincronización de alta frecuencia que hace que la sincronización sea más estable.

#### **Figura 22.**

*Procesador de señal LPS-200U*



*Nota.* Datalogger o procesador de señal LPS-200U. Obtenido de <https://www.imhpa.gob.pa/es/redscargas-electricas>, consulta: 19 de febrero de 2024. De dominio público.

#### 4.2.4. Mástil

Sirve como base de soporte para el sensor meteorológico y para la antena GPS, por lo cual debe cumplir las siguientes especificaciones:

- Debe tener una altura de 30 cm, con un diámetro de 1.5 pulgadas.
- Resistente a los elementos o que posea recubrimiento anticorrosivo.
- Angular de 6 pulgadas soldado para la instalación de estación

**Figura 23.**

*Mástil*



*Nota.* Antena GPS y antena de golpes, suetado al mástil de estación INSIVUMEH GT.  
Elaboración propia.

### 4.3. Protecciones

Para la Raspberry Pi se recomienda, por parte de los desarrolladores, el sistema operativo Raspberry Pi OS, al estar optimizado para este hardware. Pero se puede instalar alguna de estas otras distribuciones.

#### 4.3.1. OVR T2 40-150 CU

Este equipo es esencial para salvaguardar el suministro eléctrico, este se encarga de proteger contra las sobretensiones transitorias generadas por descargas eléctricas, como las descargas electroatmosféricas. Su función es crucial para prevenir daños y asegurar la continuidad del suministro eléctrico en situaciones de eventos atmosféricos adversos.

**Figura 24.**

*OVR T2 40-150 (derecha) y ALTECH B10 (izquierda)*



*Nota.* Protección contra sobre tensiones y contra sobre corrientes. Que poseen las estaciones de detección de descargas electroatmosféricas. Elaboración propia.

#### **4.3.1.1. Características técnicas**

- Tensión nominal ( $U_r$ ): 120 V CA.
- Tensión nominal de CA del sistema ( $U_o$ ): 120 V.
- Tensión nominal DC: 175 V.
- Nivel de protección de la tensión ( $U_p$ ): (LN) 0,7 kV.
- Tensión máxima de funcionamiento continuo ( $U_c$ ): (L-PE) 175 V.
- Capacidad nominal de corte en cortocircuito en servicio ( $I_{cs}$ ): 100kA.
- Corriente de descarga: Nominal 20 kA-Máximo 40 kA.
- Cortocircuito soportado  $I_{cc}$ : 200kA.
- Clase de arrestador: II.

#### **4.3.2. Breaker Alterch Corp B10**

Un disyuntor es el dispositivo de seguridad eléctrica, diseñado para proteger un circuito eléctrico de daños causados por sobre corriente. Su función es interrumpir el flujo de corriente eléctrica en caso de una falla o cortocircuito. Se activa automáticamente cuando la corriente eléctrica excede un valor seguro, lo que puede ocurrir debido a sobrecarga, cortocircuito o falla en el aislamiento de los conductores. Vea la Figura 24.

Características técnicas:

- Versión CA: 0.5-63A / 480Y/ 277V AC.
- Polo: 1.
- Características: B, C y D.
- Clasificación 8-63A (RC): 10kA.
- Temperatura de calibración: 30°C.
- Temperatura ambiente: -25°C a 60°C.



- Temperatura de almacenamiento: -25°C a 75°C.
- Aceptabilidad del tamaño del terminal: 14-18 AWG.
- Vida eléctrica: 6,000 ON/ OFF.
- Vida mecánica: 10,000 cycles ON/ OFF.
- Grado de protección de terminales: IP20.
- Orientación de montaje: cualquier posición.



## **5. IMPLEMENTACIÓN DE RED DE ESTACIONES DE DETECCIÓN DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS PARA EVALUAR LA DENSIDAD DE LOS EVENTOS**

En este capítulo, se proporciona una descripción detallada de cada paso necesario, para llevar a cabo la implementación de la red de detección de descargas atmosféricas, así como una presentación de los programas diseñados para el monitoreo del sistema. Aquí se abordarán los procedimientos y las herramientas específicas que se utilizan para asegurar una implementación exitosa de la red, así como el monitoreo eficiente de su funcionamiento. Se explorarán aspectos como la configuración, la interconexión de las estaciones, el software desarrollado para el seguimiento y control de la red. Mediante esta información, se brinda una guía completa para garantizar una implementación y monitoreo eficaces de la red de detección de descargas atmosféricas.

### **5.1. Toa system status viewer**

Con el propósito de realizar un monitoreo efectivo de la red para el proveedor, se ha desarrollado el programa *TOA System Status Viewer*. Este programa ofrece una visualización gráfica del estado de las estaciones que conforman la red centroamericana. Para su correcto funcionamiento, es necesario proporcionar la dirección IP del servidor al cual la red está conectada y se comunica. Mediante esta información, el programa es capaz de recopilar, presentar de manera clara el estado actual de las estaciones, permitiendo al proveedor tener una visión en tiempo real de la red y tomar las medidas necesarias en caso de alguna incidencia o problema técnico.

**Figura 25.**

*Programa TOA System Status Viewer*



*Nota.* Visualizador del estado de la red Centroamericana de detección de descargas atmosféricas. Elaboración propia.

El programa *TOA System Status Viewer* ha sido diseñado para proporcionar un monitoreo visual de las estaciones de la red. Mediante una codificación de colores intuitiva, se representan distintos estados de las estaciones. Las estaciones que se encuentran en línea (Up) se muestran en color verde, mientras que aquellas que están fuera de línea durante un período de minutos se representan en amarillo (Deg). Cuando el tiempo fuera de línea se incrementa a horas, las estaciones se visualizan en rojo (Down). Por último, las estaciones que han estado fuera de línea durante varios días se muestran en blanco (Unknown). Para una mejor comprensión de esta representación visual, se puede hacer referencia a la Figura 26, donde se ilustra cómo el programa muestra el estado de cada estación de manera clara y concisa.

**Figura 26.**

*Botón para ver todas las opciones de descarga*



*Nota.* Mensaje de estado de estación de detección de descargas atmosféricas. Elaboración propia.

## 5.2. Toa solution data tool

Al concluir la ejecución de este programa, se brinda la posibilidad de descargar los eventos registrados por la red de estaciones para un área específica. Esto se logra seleccionando el año, mes, día y hora deseados, así como la visualización de la densidad en el mapa. Además, se ofrece la opción de elegir el formato del archivo de descarga, ya sea KML, HTML o CSV.

Para poder acceder a la descarga, el programa requiere que se proporcionen los datos solicitados, como una medida de seguridad y para garantizar que se obtenga la información precisa según las preferencias del usuario.

**Figura 27.**

*Permisos TOA Solution Data Tool*



*Nota.* Proceso de solicitud de user name y password, para poder acceder al servidor. Elaboración propia.

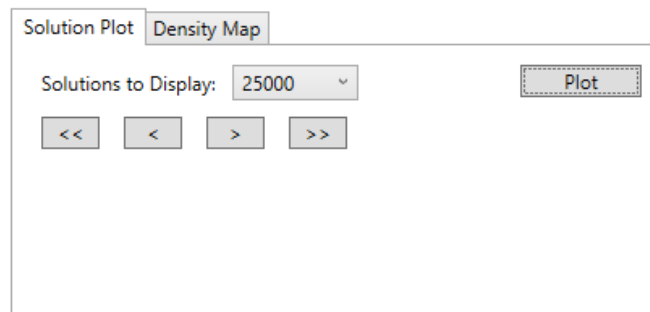
**Figura 28.**

*Parámetros de área de estudio*

*Nota.* Metodo para elegir los parametros de descarga de datos. Elaboración propia, realizado con Paint.

**Figura 29.**

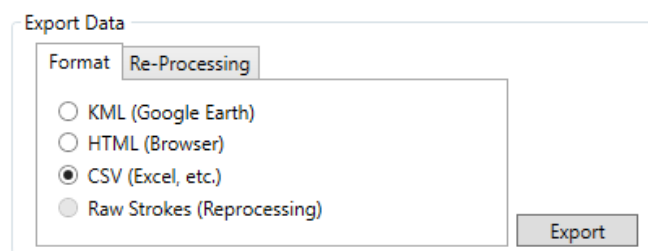
*Densidad de área de estudio*



*Nota.* Precisión y cantidad de datos. Elaboración propia, realizado con Paint.

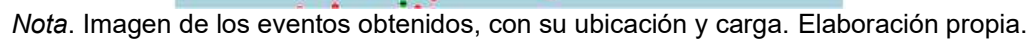
**Figura 30.**

*Tipo de archivo de descarga*



*Nota.* Tipos de documentos en los que se puede descargar los datos obtenidos por red. Elaboración propia, realizado con Paint.

### Visualización de eventos encontrados



58



**Figura 32.**

*Metadata en archivo Excel*

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
	Instant Key/Date/Time	Epoch Time	Millisecond	Major Code	Minor Code	Latitude	Longitude	Altitude	Amplitude	Cloud or Oro Major Axis	Minor Axis	Theta	QEDP	Lineup	Lineo Redundant	Rev1	Rev2	Rev3	Rev4	Rev5	
1	13002 2022-07-01 1	166667601	79760015	1	75	13.780612	-90.564668	0	5.7 Overall	750	250	31	1	8		0100A03000	030A02000	030A02001	00000000		
2	13002 2022-07-01 1	166667601	79696867	1	75	13.817025	-90.120124	0	5.5 Overall	300	250	34	1	8		0100A03000	030A02000	030A02001	00000000		
3	13004 2022-07-01 1	166667604	107771488	1	75	17.095041	-88.864207	0	0 Cloud	1750	250	1	36	18		1000A03000	030A02000	030A02001	000A02002		
4	13009 2022-07-01 1	166667609	629634760	1	75	13.792067	-90.331129	0	0 Overall	750	250	41	1	4		0100A03000	030A02000	030A02001	00000000		
5	13007 2022-07-01 1	166667606	786321790	1	75	13.757061	-90.111174	0	5.6 Overall	750	250	41	1	4		0100A03000	030A02000	030A02001	00000000		
6	13011 2022-07-01 1	166667611	18880001	1	75	14.344549	-89.712192	0	13.2 Overall	250	250	1	1	7		0100A03000	030A02000	030A02001	00000000		
7	13012 2022-07-01 1	166667612	57612393	1	80	14.846549	-89.751194	0	21.4 Overall	250	250	1	1	7		0100A03000	030A02000	030A02001	00000000		

*Nota.* Datos obtenidos del día 1 de julio del 2022. Elaboración propia, realizado con Excel.

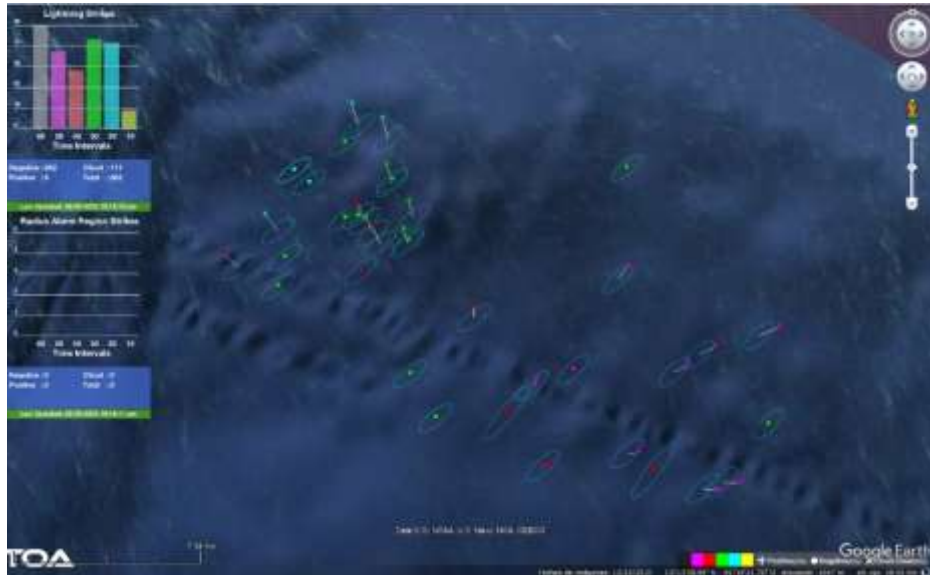
### 5.2.1. Visualización en tiempo real

El sistema cuenta con un visualizador de eventos en tiempo real que permite observar el tipo de rayo y el tiempo transcurrido desde el evento en relación con el tiempo actual. Para facilitar la interpretación de la información, se utiliza una codificación de colores para representar la duración de los eventos en el programa. Es importante destacar que, después de una hora, los eventos son eliminados del visualizador.

En este sentido, los eventos recién detectados con un tiempo transcurrido inferior a 10 minutos se representan con el color amarillo, mientras que aquellos entre 10 a 20 minutos se muestran en celeste. Los eventos con una duración de entre 20 a 30 minutos se identifican mediante el color verde, seguidos por los eventos de 30 a 40 minutos, representados en rojo. Por último, los eventos con un tiempo transcurrido de entre 40 y 50 minutos se presentan en color morado. Para visualizar esta información de manera más clara, se puede consultar la Figura 31.

**Figura 33.**

*Tipos de descarga electroatmosféricas detectados*



*Nota.* Imagen del visualizador en tiempo rel de eventos. Elaboración propia, realizado con Paint.

El programa describe cada evento de la siguiente manera:

- Nube-nube (X).
- Negativos (•).
- Positivos (+).

La presión de la ubicación de cada evento depende de cuantas estaciones detecten el evento. Ver la Figura 34. Será demostrada la incerteza del lugar donde posiblemente sucedió, con un ovalo si fue detectado por lo menos dos estaciones y con un círculo a los eventos que fueron detectados por más de tres estaciones. (Ver la Figura 35).

**Figura 34.**

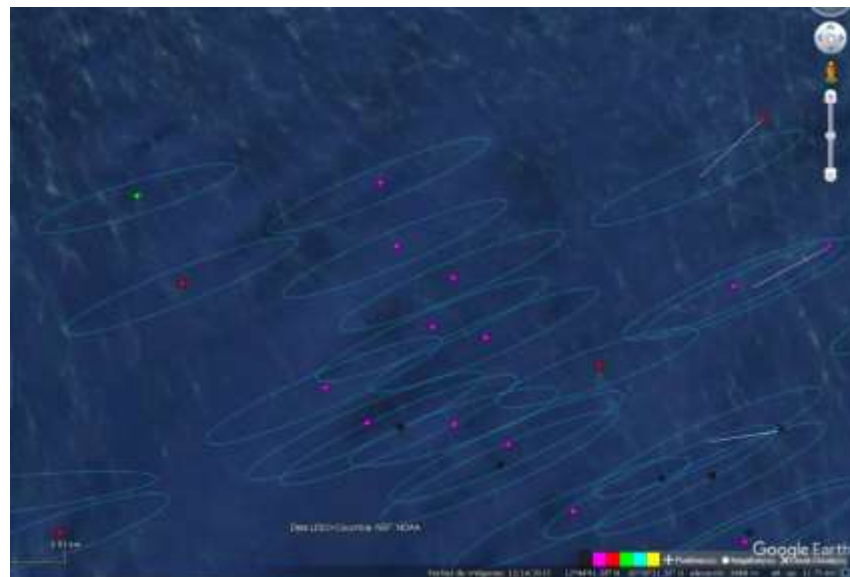
*Detección*



*Nota.* Datalogger o procesador de señal LPS-200U. Obtenido de <https://www.imhpa.gob.pa/es/redscargas-electricas>, consulta: 19 de febrero de 2024. De dominio Público.

**Figura 35.**

*Incerteza*



*Nota.* Imagen del visualizador en tiempo real de eventos con sus incertezas. Elaboración propia.

### **5.3. Análisis de datos obtenidos**

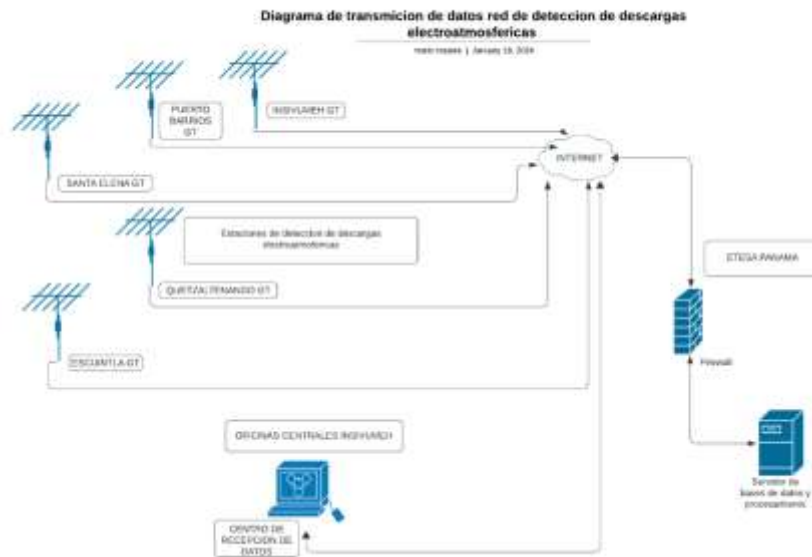
La elección de Panamá como ubicación para el servidor procesador central se basa en diversos factores estratégicos. En primer lugar, se garantiza un acceso confiable a la energía eléctrica, lo que es fundamental para el funcionamiento continuo y sin interrupciones del sistema. Además, se asegura una conexión a internet estable de alta velocidad, lo que permite una transmisión fluida de los datos recopilados desde las estaciones de detección de descargas atmosféricas hacia el servidor central.

El servidor procesador central desempeña un papel clave en el procesamiento y análisis de los datos. Está equipado con una potente capacidad de procesamiento, lo que permite realizar cálculos complejos algoritmos avanzados para clasificar y organizar los datos según su país de origen. A través de este proceso, se obtienen resultados específicos para cada país, lo que brinda una visión detallada de la distribución y densidad de los eventos de descargas atmosféricas en cada territorio.

Además, el servidor procesador central del SCAL se caracteriza por su capacidad de almacenamiento de datos a gran escala, lo que permite mantener un registro histórico de los eventos de descargas atmosféricas y facilita el análisis comparativo a lo largo del tiempo. Esto proporciona información valiosa para identificar tendencias, patrones estacionales y cambios en la distribución geográfica de los eventos climáticos.

**Figura 36.**

*Diagrama transmisión*



*Nota.* Diagrama de transmisión de datos de la red de 5 estaciones al servidor ubicado en Panamá. Elaboración propia, realizado con Lucidchart.

### 5.3.1. Procesamiento

En la Figura 37, se muestra el análisis realizado utilizando el programa ArcMaps, el cual permite clasificar los datos obtenidos a través del programa Data Tool. Esta clasificación se lleva a cabo al seleccionar los datos por país y departamento. De esta manera, se logra interpretar los datos a nivel de departamentos durante los meses del presente estudio.

Al obtener los resultados de los eventos por mes, es posible calcular un promedio de eventos ocurridos. Posteriormente, al dividir este promedio por los kilómetros cuadrados de cada departamento, se puede determinar la densidad

de eventos por kilómetro cuadrado que ocurren en el país durante una temporada lluviosa.

Este enfoque de análisis permite obtener una visión más detallada de la distribución, concentración de eventos climáticos, brindando información valiosa para comprender mejor las características geográficas y climáticas del país en estudio.

**Tabla 3.**

*Datos analizados*

No.	Departamentos	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	total	kilometros cuadrados	Densidad
1	Alta Verapaz	60771	98910	6252	111644	85211	85211	74666.5	8686	8.59618927
2	Baja Verapaz	27043	38937	2606	26274	35362	35362	27597.3333	3124	8.833973538
3	Chimaltenango	23072	52586	2824	7775	36144	36144	26424.1667	1979	13.3522823
4	Chiquimula	14713	16114	1055	16154	25163	25163	16393.6667	2370	6.899691338
5	Guatemala	8187	13823	2037	55299	25506	54057	26484.8333	2126	12.45758859
6	El Progreso	15250	39852	1459	11859	54057	40113	27098.3333	1922	14.09902879
7	Escuintla	12321	30344	977	20732	40113	25506	21665.5	4386	4.939694482
8	Huehuetenango	19713	57892	8340	24582	31276	31276	28846.5	7400	3.898175676
9	Izabal	13221	28058	1978	40411	31924	31924	24586	9038	2.7202921
10	Jalapa	18929	48949	2736	63191	77734	77734	48212.1667	2063	23.36993052
11	Jutiapa	22484	47359	2319	41059	64522	64522	40377.5	3216	12.55519279
12	Petén	41817	96511	1921	137805	79132	79132	72719.6667	35854	2.028216285
13	Quetzaltenango	930	1924	94	2536	1604	1604	1448.6667	1953	0.741764806
14	Quiché	77436	110650	6034	36821	85115	85115	66861.8333	8378	7.98064375
15	Retalhuleu	1277	2934	204	2848	3492	3492	2374.5	1856	1.279364224
16	Sacatepequez	3442	3919	296	2932	6406	6406	3900.1667	465	8.387455192
17	San Marcos	1053	2727	132	3085	1228	128	1392	3791	0.367185439
18	Santa Rosa	23627	57181	1857	51105	73981	73981	46955.3333	2995	15.67790762
19	Sololá	12165	17900	1582	5155	23077	23077	13826	1061	13.03110273
20	Suchitepequez	10034	23797	2533	6324	20647	20647	13997	2510	5.578494024
21	Totonicapán	9133	19771	2606	13249	17836	17836	13405.1667	1061	12.63446434
22	Zacapa	16554	21556	759	27091	14664	14664	15881.3333	2690	5.903841388
	total por mes	433171	831694	50601	707931	834194	833094		108930	
	datos reales	433181	831717	50854	708716		835783			
	Pérdida de datos	10	23	253	785	-834194	2689			

*Nota.* Números promedio de descargas atmosféricas por departamentos. Elaboración propia, realizado con Excel.

Durante el tiempo de estudio, se ha constatado que el departamento de Jalapa exhibe la mayor densidad de relámpagos en comparación con todos los demás departamentos. Por otro lado, se ha observado que el departamento de

Quetzaltenango presenta la menor cantidad de eventos por kilómetro cuadrado en términos de actividad eléctrica atmosférica.





## **6. MANUAL DE MANTENIMIENTO**

Es fundamental llevar a cabo mantenimientos preventivos cada seis meses, con el fin de prevenir posibles averías ocasionadas por el uso constante, el desgaste natural o el paso del tiempo. Estas acciones de mantenimiento garantizan que la estación funcione de manera óptima y confiable a lo largo del tiempo, evitando interrupciones en su operatividad, asegurando la precisión en la recopilación de datos meteorológicos y climáticos.

### **6.1. Hardware**

- Consideraciones
  - Lea atentamente las instrucciones antes de conectarse a la estación.
- Precauciones
  - Evite el uso de solventes para limpiar el producto porque los vapores residuales sesgarán las lecturas de la calidad del aire.
  - Evite el agua u otros líquidos cerca del producto para evitar daños eléctricos.
  - No permita modificaciones o reparaciones no autorizadas de este producto, debido a pérdidas de comunicación con el servidor

Para realizar el mantenimiento preventivo debe seguir los siguientes pasos:

- Realizar un chequeo de la transmisión y validación de datos diarios.
- Revisión visual de regulador de carga, breaker, batería y luces de estados.

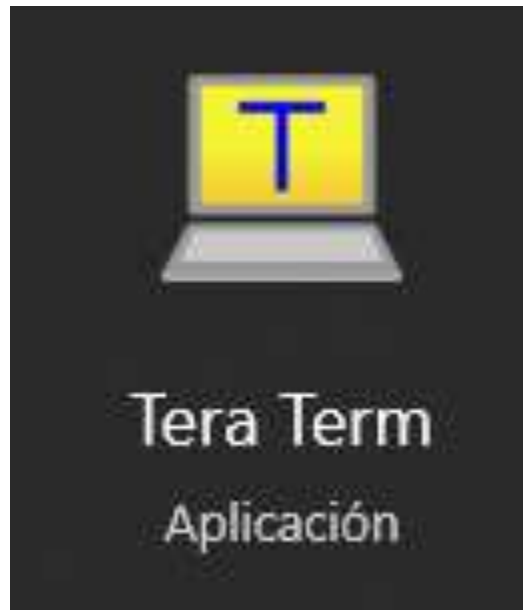
- Verificación de valor de batería con multímetro.
- Apagar la estación meteorológica.
  - Desconecte todas las terminales del regulador de carga batería.
  - Retire el conector de sensores acoplados a los Procesador de señal (LPS-200U).
- Realizar limpieza con limpia contactos y aire comprimido en todas las terminales.
- Verificación de sensores.
- Realizar limpieza a cada sensor.
- Conecte nuevamente las terminales.
  - Conecte el adaptador de los (LPS-200U).
  - Conecte nuevamente las terminales del regulador batería. El procesador se iniciará automáticamente.
- Verificar la transmisión de datos a servidor.

## **6.2. Software**

El software empleado para la conexión con la estación es Tera Term El software utilizado para la conexión con la estación es Tera Term, el cual ofrece la funcionalidad de modificar los parámetros. Gracias a esta herramienta, se pueden realizar ajustes, configuraciones precisas en la estación meteorológica, lo que resulta esencial para adaptarla a diferentes condiciones y necesidades específicas.

**Figura 37.**

*Fichero de script*



*Nota.* Imagen del icono de la aplicación Tera Term. Elaboración propia, realizado con Paint.

Para realizar el mantenimiento preventivo debe realizar los siguientes pasos:

- Para procesos de análisis de funcionamiento con el programa Tera Term.
  - Seleccionando en Setup-Terminal, se selecciona la forma de transmitir CR+LF.
  - Setup-Serial port, se modifica la velocidad del puerto de comunicación a 115200.
- Se genera el acceso a la terminal ejecutando los siguientes comandos:  
Ver figura 39.
  - Reboot.
  - Status.

Nota: Mediante la terminal, es posible programar la estación para establecer el tipo de conexión de internet deseado, ya sea utilizando una IP estática o dinámica. Esta configuración permitirá adaptar la estación a las necesidades específicas del entorno de instalación, garantizar una comunicación eficiente y confiable con el servidor central. Es importante asegurarse de seleccionar la opción más adecuada en función de las características, requerimientos de la red local, lo que permitirá mantener una conexión estable, continua para el intercambio de datos y la transmisión de información meteorológica en tiempo real.

**Figura 38.**

*Fichero de script*

```

COM4 - Tera Term VT
File Edit Setup Control Window Help

? or help      - Show command line options
ip/ip=?        - Get/Set IP address (xxx.xxx.xxx.xxx)
gw/gw=?        - Get/Set Gateway address (xxx.xxx.xxx.xxx)
mask/mask=?    - Get/Set Subnet mask (xxx.xxx.xxx.xxx)
dhcp/dhcp=?    - Get/Set DHCP option flag (1 or 0)
boot/reboot    - Reboot
volts          - Show input voltage level
mac            - Show MAC address
status         - Show status flags
server         - Show server connection status
strokes        - Show stroke counts
ver            - Show software/firmware revision
sensor         - Show sensor id
gain           - Show RF gain
gps            - Show gps info
temperature    - Show curr temperature
stacks         - Show stack usage
vhf            - Show UHF card info
status
[appLog.c:1426] CONFIG VALID   Yes - config was valid at startup
[appLog.c:1431] GPS LOCK      Yes
[appLog.c:1436] SERVER CONNECT Yes
[appLog.c:1443] FPGA LOADED   Yes
[appLog.c:1448] STROKES NOISY No Cnt 0 (MAX STROKES/SEC 25)
[appLog.c:1454] UHF CARD FAULT 0
[appLog.c:1456] NOISE DETECT: NOISY=DISABLE AFTER 3 SECS; QUIET=ENABLE AFTER 10 SECS

```

Nota. Comandos de programación de una estación de detección de descargas atmosféricas.  
Elaboración propia.

## CONCLUSIONES

1. Se realizó el diseño y la implementación exitosa de una red de cinco estaciones de detección de descargas electroatmosféricas, empleando equipos de la reconocida marca TOA Global Lightning Detection, donados por la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID).
2. Se llevó a cabo el análisis, identificando cinco lugares que cumplieran con las especificaciones técnicas del fabricante TOA *Global Lightning Detection*. En los departamentos de Guatemala, Petén, Izabal, Escuintla, Quetzaltenango, colocada de tal manera que las áreas de detección se interconectarán, logrando así un sistema de triangulación efectivo para una cobertura total en el territorio nacional.
3. Se analizó el sistema de puesta a tierra de cada uno de los puntos seleccionados para la instalación de las estaciones, que incluyó la validación y corrección del sistema. Se aseguró una adecuada protección de sistema de puesta tierra y funcionamiento de las estaciones de detección de descargas atmosféricas.
4. Se analizó la época lluviosa del año 2020, se analizaron los datos registrados para determinar la densidad de descargas electroatmosféricas a nivel nacional. Los resultados presentados en la Figura 37, indican que el departamento de Jalapa presenta la mayor densidad, con 23.37 eventos por kilómetro cuadrado, superando a todos los demás departamentos. En contraste, Quetzaltenango registra la menor cantidad, con 2.03 eventos

por kilómetro cuadrado, evidenciando la mínima actividad eléctrica atmosférica a nivel nacional. Estos hallazgos son cruciales para comprender la distribución y la intensidad de las tormentas eléctricas en el país, ofreciendo aportes valiosos para la planificación y la prevención de riesgos en áreas con mayor actividad eléctrica.

5. Se impartió una capacitación técnica al personal de INSIVUMEH, enfocado en la correcta manipulación, configuración, actualización del equipo y análisis de datos, en aras de contribuir a la prevención de riesgos asociados con tormentas eléctricas en el territorio guatemalteco.

## RECOMENDACIONES

1. Tener un inventario con repuestos mínimos requeridos para un buen funcionamiento por estas estaciones. Dado que es una obligación que INSIVUMEH adquirió a la hora de firmar el convenio.
2. Es importante tener comunicación constante con CONRED para garantizar el buen funcionamiento que se encuentran instaladas en sus sedes departamentales.
3. Formalizar una solicitud a Empresa de Transmisión Eléctrica S.A. (ETESA), entidad homóloga de INSIVUMEH en Panamá. El propósito de esta solicitud es obtener autorización para acceder a su servidor, facilitando de esta manera la descarga automatizada y eficiente de la información requerida.
4. Se sugiere la implementación de un sistema redundante que emplee un modem LTE con la correspondiente cobertura brindada por el proveedor del SIM con alcance internacional, permitiendo la comunicación a través de una red privada virtual, reconocida como VPN. Este enfoque se puede complementar mediante la utilización de un switch programable.
5. Seguir capacitación técnica con la empresa TOA *LIGHTNING DETECTION* para mantener un buen manejo del equipo.





## REFERENCIAS

ABB. (03 de Mayo de 2023). *OVR T2 40-150 CU Surger Protective Device*.  
<https://new.abb.com/products/es/2CTB802348R3500/ovr-t2-40-150-c-u>

ADELSYSTEM. (S.F). *CBI123A Data sheet \_R31*.  
<https://www.adelsystem.com/en/products/battery-chargers-cb/>

Altech-Instruction. (S.F.). *CBI123A ALL IN ONE*.  
[https://www.altechcorp.com/power/CB-CBI\\_SpecSheets/manual-CBI-122448.pdf](https://www.altechcorp.com/power/CB-CBI_SpecSheets/manual-CBI-122448.pdf)

Chachaia, F. H. (17 de Enero de 2024). *LIGHTNING PROTECTION OF THATCHED ROOFED STRUCTURE*.  
<https://core.ac.uk/download/pdf/39665606.pdf>

COMO FUNCIONA QUE. (17 de Enero de 2024).  
<https://comofuncionaque.com/como-funciona-el-gps/>

Corp., A. (Mayo de 2020). *Alterch Corp*.  
<https://www.altechcorp.com/HTML/MDS-A.html>

EMPRESARIAL, T. (17 de Enero de 2024). *Introducción a las comunicaciones inalámbricas (II)*.  
<https://tpempresas.com/introduccion-a-las-comunicaciones-inalambricas-ii>

Encalada, S. I. (2018). *Diseño, desarrollo e implementacion de una estación meteorológica vasada en una red jerárquica de sensores, software libre y*

*sistemas embebidos para la empresa elecaustro en la minicentral Gualaceo utilizando comunicación MQTT y MODBUS.*

Hignio AbelVillalta Cruz, G. S. (Febrero de 2013). *Implementacion de una estación meteorológica*.  
<https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/4372/1/Implementaci%C3%B3n%20de%20una%20estaci%C3%B3n%20meteorol%C3%B3gica.pdf>

IMHPA. (17 de Enero de 2024). *Red de deteccion de Rayos*.  
<https://www.imhpa.gob.pa/es/redscargas-electricas>

INSIVUMEH. (17 de Enero de 2024). *Organigrama de INSIVUMEH*.  
<https://insivumeh.gob.gt/?p=130>.

KINENERGY. (17 de Enero de 2024). *Sistema de protección contra descargas atmosféricas*.  
<https://www.kin.energy/blogs/post/sistema-de-protecci%C3%B3n-contra-descargas-atmosf%C3%A9ricas>

Laroj, G. R. (Mayo de 2004). *Actualización del mapa isoceraúnico de Guatemala y su influencia en el diseño de líneas de transmisión*.  
<https://docplayer.es/17131251-Actualizacion-del-mapa-isoceraunico-de-guatemala-y-su-influencia-en-el-diseno-de-lineas-de-transmision.html>

Martinez, H. (17 de Enero de 2024). *La antena de Cuadro o "Magnetic Loop"*.  
<https://www.qsl.net/lw3dfa/antenacuadro.htm>

Matos, F. A. (Diciembre de 2012). *Sistema Terrestre de Detección de Descargas Eléctricas Atmosféricas*.

[https://bibliotecaunapec.blob.core.windows.net/tesis/TESIS\\_C2 IEA\\_01\\_2012\\_ET130190.pdf](https://bibliotecaunapec.blob.core.windows.net/tesis/TESIS_C2 IEA_01_2012_ET130190.pdf)

MICROTRON.BE. (17 de Enero de 2024). <https://www.microtron.be/media/b1fe41f6fd49582f7e886fd93eb6adba/bullet-iii-gps-antenna.jpg>

Pérez, R. E. (Febrero de 2007). *Consideraciones técnicas y fundamentos de protección contra descargas electroatmosféricas y pulsaciones electromagnéticas para una radiobase con tecnología de CDMA.* [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_0629\\_EA.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0629_EA.pdf)

Prado, M. V. (2012). *Consideracion básicas sobre parámetros meteorológicos y su importancia en el diseño, construcción y operación de proyectos de infraestructura.*

QSL.net. (17 de Enero de 2024). *Antena* . <https://www.qsl.net/w5taz/projects.htm>

STEREN. (17 de Enero de 2024). *Antena bullet iii.* <https://www.microtron.be/media/b1fe41f6fd49582f7e886fd93eb6adba/bullet-iii-gps-antenna.jpg>

Tomas, G. (17 de Enero de 2024). *Biblioteca Usac* . [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_0518\\_EA.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0518_EA.pdf)

ZAK, M. (17 de Enero de 2024). *¿Como se detectan los rayos en la República Checa?* <https://www.in-pocasi.cz/clanky/teorie/detekce-blesku-18.7.2014/>



## APÉNDICE

### Apéndice 1.

#### Lista de personal capacitado

Participación de Capacitación de Estaciones Meteorológicas de Detección de Descargas Electroinmagneticas			
EPS Mario Ruben Rosales Najera			
No.	Nombre	DPI	Firma
1	Heriberto Finales	1973-05-01	[Firma]
2	Rolando Ceballos	1973-05-01	[Firma]
3	Alfonso Gail	1973-05-01	[Firma]
4	José Ochoa	1973-05-01	[Firma]
5	Pedro Pablo Molina	1973-05-01	[Firma]
6	Carlos Chicelax	1973-05-01	[Firma]
7	Carlos José Hernández Sosa	1973-05-01	[Firma]
8	Francisco Andrés Rojas Sosa	1973-05-01	[Firma]
9	Dona Luisa Lora	1973-05-01	[Firma]
10	Juan F. Valdivia Morales	1973-05-01	[Firma]
11	Peter Argente	1973-05-01	[Firma]
12	Norma C. Lora	1973-05-01	[Firma]
13	Carlos José Trujillo López	1973-05-01	[Firma]
14	Noé Celina Diego	1973-05-01	[Firma]
15			
16			
17			
18			
19			
20			
21			
22			

Nota. Listado de personal capacitado. Elaboración propia.