

PLAN DE TRABAJO DE GRADO

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA ESTACIÓN
METEOROLÓGICA PARA LA MEDICIÓN DE CAMPO
ELÉCTRICO ATMOSFÉRICO EN OBSERVATORIOS DE RAYOS
CÓSMICOS.**

Autores

LEONARDO ANTONIO FLÓREZ VILLEGAS
PEDRO ANDRÉS SALGADO MEZA

Director

JESÚS PEÑA RODRÍGUEZ

Codirectores

LUIS ALBERTO NÚÑEZ DE VILLAVICENCIO MARTÍNEZ
JAIME GUILLERMO BARRERO PÉREZ

ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
BUCARAMANGA
2019

ELABORADO POR:	REVISADO POR:	APROBADO POR:
<hr/> Leonardo Antonio Flórez Villegas <i>Estudiante de Ingeniería Electrónica</i> Código UIS: 2141838	<hr/> Ph.D.(c) Jesús Peña Rodríguez <i>Director del trabajo de grado</i>	Comité de trabajos de grado E ³ T Acta no. _____ del _____ de _____ de 2019 código del trabajo: _____ <hr/> evaluador designado por el comite
<hr/> Pedro Andrés Salgado Meza <i>Estudiante de Ingeniería Electrónica</i> Código UIS: 2122966	<hr/> MSc. Jaime Guillermo Barrero Pérez <i>Codirector del trabajo de grado</i>	<hr/> Ph.D. Luis Alberto Núñez de Villavicencio Martínez <i>Codirector del trabajo de grado</i>

Universidad Industrial de Santander (UIS) Documento Confidencial

Ni la totalidad ni parte de este documento puede reproducirse, almacenarse o transmitirse por algún procedimiento electrónico o mecánico, incluyendo fotocopias, grabación magnética o electrónica o cualquier medio de almacenamiento de información y sistemas de recuperación, sin permiso escrito de la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.

Este es un documento interno de la UIS. Al recibirlo no podrá pasarlo a persona alguna excepto las que se le indique en la lista de distribución autorizada por la UIS. Cualquier persona externa a la UIS que utilice la información en este documento asume la responsabilidad por su empleo.

Índice general

Lista de figuras	5
Lista de tablas	6
Ficha Resumen	7
1. Descripción del trabajo	8
2. Planteamiento del Problema	9
3. Justificación	11
4. Objetivos	13
4.1. Objetivo General	13
4.2. Objetivos Específicos	13
5. Marco Teórico	14
5.1. Rayos cósmicos	14
5.2. Influencia del campo eléctrico en CRs atmosféri- cos	15
5.3. Campo eléctrico rápido y lento	16
5.3.1. Sensor de campo eléctrico lento tipo molino	17
5.3.2. Antena de platos paralelos	18
6. Metodología	20
6.1. Revisión bibliográfica	20

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	4
6.2. Selección de hardware	20
6.3. Diseño de la arquitectura	20
6.4. Construcción del prototipo	21
6.5. Sistema de adquisición y transmisión	21
6.6. Prueba de funcionamiento y validación	21
6.7. Informe final	21
7. Cronograma de actividades	22
8. Recursos e Infraestructura	23
8.1. Recursos Humanos	23
8.2. Materiales	23
8.3. Equipos	24
Bibliografía	25

Índice de figuras

5.1.	Cascada de rayos cósmicos. Tomado de Página oficial del CERN	15
5.2.	Número de e^+ (azul), e^- (rosado) y γ (rojo) como función de la profundidad atmosférica con un campo eléctrico de 1 kV/m (izquierda) y -1 kV/m (derecha). Tomado de [1]	16
5.3.	Esquema básico del sensor de campo eléctrico tipo molino. La lámina obturadora controla de manera periódica la carga y descarga del plato sensible debido al campo eléctrico incidente. Tomado de [2]	17
5.4.	Sensor de placas paralelas. Tomado de [3]	18
7.1.	Cronograma de actividades.	22

Índice de tablas

8.1. Recursos Humanos.	23
8.2. Materiales	24
8.3. Equipos	24

FICHA RESUMEN

Título	Diseño e implementación de una estación meteorológica con énfasis en la medición de campo eléctrico para observatorios de rayos cósmicos.
Autores:	Leonardo Antonio Flórez Villegas ¹ , leonardo.florez@correo.uis.edu.co Pedro Andrés Salgado Meza ² , pedro.salgado@saber.uis.edu.co
Director:	Jesús Peña Rodríguez ³ , jesus.pena@correo.uis.edu.co
Codirector:	Luis Alberto Núñez de Villavicencio Martínez ⁴ , lnunez@uis.edu.co Jaime Guillermo Barrero Pérez ⁵ , jbarrero@uis.edu.co
Modalidad:	Trabajo de investigación
Duración:	8 meses
Entidades Interesadas:	<ul style="list-style-type: none">- Universidad Industrial de Santander (UIS).- Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones (E3T).- Grupo de Control, Electrónica, Modelado y Simulación, (CEMOS).
Objetivo General:	Diseñar un prototipo de estación meteorológica autónoma para la medición del campo eléctrico atmosférico en observatorios de astropartículas.

¹Estudiante de Ingeniería Electrónica de la UIS. Código: 2141838.

²Estudiante de Ingeniería Electrónica de la UIS. Código: 2122966.

³Ph.D(c) en Física.

⁴Profesor Titular UIS.

Capítulo 1

Descripción del trabajo

En la ejecución de este proyecto se fabricará un prototipo de estación meteorológica, que permita la medición del campo eléctrico atmosférico rápido ($0.1 \text{ MHz} - 1 \text{ MHz}$) y lento ($0.1 \text{ Hz} - 1 \text{ kHz}$) con el fin de estudiar posibles correlaciones entre sus variaciones y el aumento o disminución de flujo de CRs (Rayos Cósmicos) a nivel de suelo.

El prototipo integrará además la medición de otras variables meteorológicas como la temperatura, presión atmosférica y humedad así como un GPS para establecer la ocurrencia temporal de los eventos registrados.

El trabajo a realizar se divide en 4 partes:

- Estado del arte y documentación.
- Diseño de sensores de campo eléctrico.
- Diseño y construcción del prototipo.
- Pruebas y análisis de datos.

Capítulo 2

Planteamiento del Problema

Los rayos cósmicos son partículas altamente energéticas que llegan a nuestro planeta tras propagarse por el espacio. Proceden de fenómenos astrofísicos violentos tales como fulguraciones solares o explosiones de supernovas. Cuando un rayo cósmico ingresa a la atmósfera, interactúa con los átomos que la componen creando chubascos de partículas secundarias, también llamados lluvias aéreas extendidas (EAS).

Los rayos cósmicos secundarios pueden ser usados en diferentes aplicaciones, que abarcan desde el entendimiento de la naturaleza de los rayos cósmicos primarios, hasta aplicaciones en clima espacial, física de altas energías [4], muongrafía [5] entre otras.

Debido a que la mayoría de partículas generadas en la atmósfera poseen carga, estas pueden ser afectadas por los campos eléctricos presentes durante las tormentas, causando un aumento en el flujo de secundarios a nivel del suelo. Actualmente se han realizado algunos estudios correlacionando ambos fenómenos. Wang et al. [6] y Alexeenko et al. [7] concluyeron que el número de muones detectados a nivel de suelo es modulado por la magnitud del campo eléctrico atmosférico. Bartoli et al. [8] observaron un decrecimiento en el número de electrones registrados por ARGO-

YBJ durante tormentas eléctricas, mientras que Huang et al. [1] encontraron que la variación en el número de electrones y gammas depende de la polaridad del campo eléctrico atmosférico.

Sin embargo, el estudio de eventos transitorios en el flujo de secundarios se ha limitado en profundidad ya que el registro de datos de campo eléctrico atmosférico durante tormentas es escaso en los observatorios de CRs (Rayos Cósmicos). Por esta razón, es necesario conocer la intensidad y las variaciones del campo eléctrico atmosférico con el fin de correlacionar su efecto sobre los transitorios en la tasa de partículas detectadas a nivel de suelo.

Capítulo 3

Justificación

El campo eléctrico atmosférico varía desde ± 100 V/m en condiciones ambientales normales, hasta ± 100 kV/m durante tormentas. Los CRs secundarios cargados, principalmente electrones y positrones, pueden ser acelerados bajo la influencia de dicho campo [9, 10], generando un efecto de RREA (por sus siglas en inglés Relativistic Runaway Electron Avalanches) [11] que aumentan el conteo de eventos en los detectores a nivel de suelo.

En campos eléctricos negativos (es decir, aceleración de partículas con carga negativa hacia abajo), las tasas de conteo de partículas secundarias a nivel de suelo aumentan con la intensidad del campo eléctrico. En campos eléctricos positivos, las tasas disminuyen con la intensidad del campo [12]. Estos resultados, por primera vez, dan una explicación coherente del origen de la variación del flujo de electrones o positrones observado durante décadas por los detectores de CRs a gran altitud durante las tormentas eléctricas [13].

Teniendo en cuentas los hechos anteriormente mencionados, un sistema de monitoreo de campo eléctrico, permitiría correlacionar la variación del campo eléctrico y la cantidad de partículas

secundarias medidas por los detectores, y de esta manera entender los mecanismos atmosféricos de aceleración.

Capítulo 4

Objetivos

4.1. Objetivo General

Diseñar un prototipo de estación meteorológica para la medición del campo eléctrico atmosférico en observatorios de astro-partículas.

4.2. Objetivos Específicos

- Diseñar e implementar un sensor de campo eléctrico rápido ($0.1 \text{ MHz} - 1 \text{ MHz}$) y lento ($0.1 \text{ Hz} - 1 \text{ kHz}$) para tormentas eléctricas.
- Implementar en la estación de monitoreo sensores complementarios de temperatura, presión y humedad.
- Implementar mediante GPS la sincronización temporal y espacial de los eventos registrados.
- Desarrollar una interfaz gráfica para la visualización de los datos recolectados.

Capítulo 5

Marco Teórico

5.1. Rayos cósmicos

Los rayos cósmicos fueron descubiertos por el físico austríaco Víctor Hess en 1911. El experimento consistió en medir la radiación ionizante en la atmósfera usando en un globo aerostático. Hess esperaba observar una disminución en dicha radiación a medida que se alejaba de la superficie, sin embargo encontró un aumento, concluyendo que dicha radiación debía provenir de algún lugar fuera del planeta.

Los rayos cósmicos primarios pueden ser partículas subatómicas que viajan a grandes velocidades a través del espacio hasta llegar a nuestro planeta. Estas partículas son aceleradas por campos magnéticos presentes en los cuerpos astrofísicos (estrellas, galaxias entre otras) hasta que algunas culminan su trayectoria en la tierra.

La detección indirecta de rayos cósmicos se hace mediante observatorios basados en detectores Cherenkov de agua (WCD), centelladores, telescopios de fluorescencia, IACT (Telescopios de Cherenkov en el Aire) y antenas. Con los datos recolectados se reconstruyen la cascada de partículas secundarias para poder determinar dos cosas principalmente, qué partícula originó la cascada y cuál fue su dirección de incidencia.

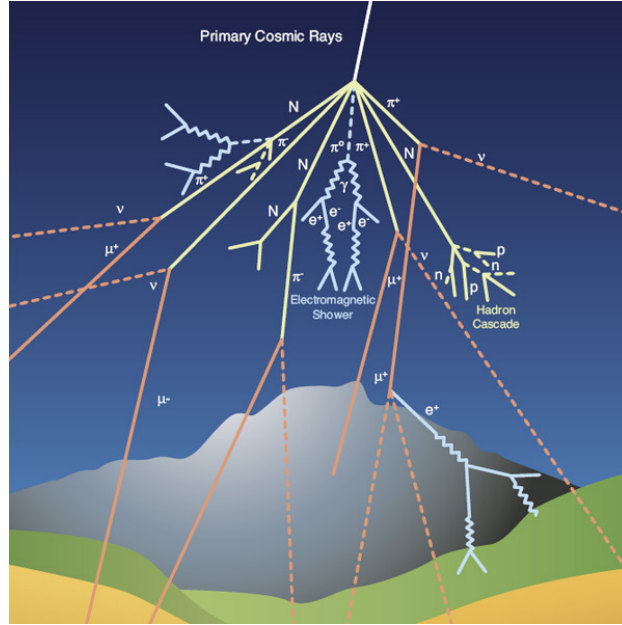


Figura 5.1: Cascada de rayos cósmicos. Tomado de Página oficial del CERN

5.2. Influencia del campo eléctrico en CRs atmosféricos

Las partículas secundarias se dividen en tres componentes: la electromagnética (electrones, positrones y fotones), la hadrónica y la penetrante (muones y neutrinos). En presencia de campos eléctricos mayores a 25 kV/m el número de partículas de la componente electromagnética aumenta [14].

Al exponer positrones y electrones a un campo eléctrico se observa una aceleración o desaceleración en ambas partículas dependiendo su polaridad, generando avalanchas subsecuentes [1].

Como se puede apreciar en la Fig. 5.2, un campo eléctrico con polaridad negativa, donde las nubes tienen carga negativa y el suelo positiva, produce una aceleración en los electrones y un frenado en los positrones, además de un aumento en los fotones debido al Bremsstrahlung. Al invertir la polaridad del campo,

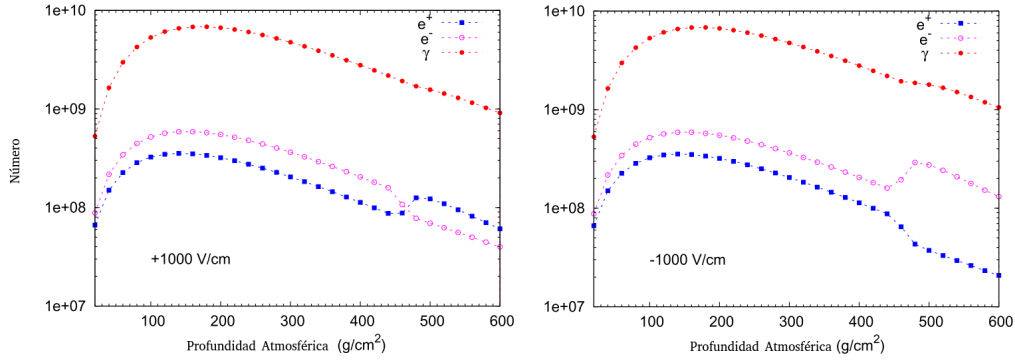


Figura 5.2: Número de e^+ (azul), e^- (rosado) y γ (rojo) como función de la profundidad atmosférica con un campo eléctrico de 1 kV/m (izquierda) y -1 kV/m (derecha). Tomado de [1]

los positrones son acelerados y los electrones desacelerados.

Este aumento en las partículas secundarias producidas durante las alteraciones del campo eléctrico en condiciones atmosféricas adversas puede atribuirse erróneamente a la energía de la partícula primaria que desencadenó la cascada. Por ello es importante lograr correlacionar este aumento en algunas partículas secundarias durante una tormenta con el campo eléctrico atmosférico.

5.3. Campo eléctrico rápido y lento

El planeta Tierra contiene en su atmósfera gran cantidad de gases que son ionizados por los rayos cósmicos aumentando la conductividad del aire. La atmósfera terrestre es análoga a un gran condensador cuyo potencial puede llegar hasta los 300 kV [3].

En condiciones ambientales normales el campo eléctrico terrestre es constante, pero durante una tormenta este varía de forma escalonada, produciendo cambios que pueden durar desde 1 ms hasta 10 s, a este comportamiento se le conoce como campo eléctrico lento. Durante estos aumentos o disminuciones

se producen transitorios, cuya frecuencia puede variar de 1 kHz a 1 MHz, los cuales son llamamos campo eléctrico rápido.

Para el monitoreo de éstos eventos se usan dos tipos de sensores, uno para el campo eléctrico rápido y otro para el campo eléctrico lento.

5.3.1. Sensor de campo eléctrico lento tipo molino

Este sensor consiste en un motor DC que lleva acoplado a su rotor un placa metálica (obturador giratorio) que obstruye la influencia del campo eléctrico atmosférico sobre el electrodo sensor como se puede ver en la Fig. 5.3.

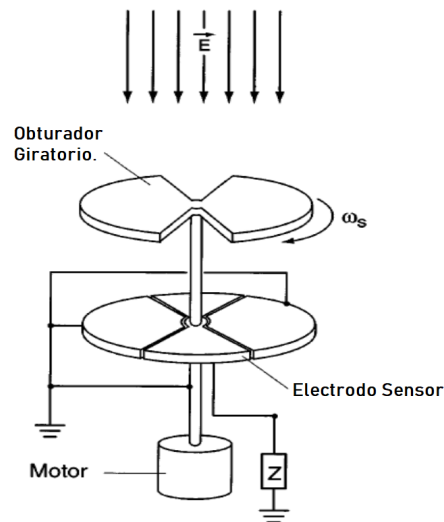


Figura 5.3: Esquema básico del sensor de campo eléctrico tipo molino. La lámina obturadora controla de manera periódica la carga y descarga del plato sensible debido al campo eléctrico incidente. Tomado de [2]

La placa superior deja al descubierto gradualmente la lámina sensible permitiendo que ésta se cargue debido al campo eléctrico atmosférico incidente. Luego la lámina sensible es cubierta por el obturador generando de esta manera su descarga. Como

resultado se obtiene es una señal sinusoidal cuya frecuencia depende de la frecuencia de giro del motor y cuya amplitud es proporcional a la magnitud del campo eléctrico atmosférico.

La fase de la señal depende de la polarización del campo eléctrico y se determina mediante un *encoder* que sensa el paso del obturador sobre la lámina sensible.

5.3.2. Antena de platos paralelos

Para lograr medir las variaciones de campo eléctrico rápido generalmente se utiliza una antena de placas paralelas como se muestra en la Fig. 5.4 [3].

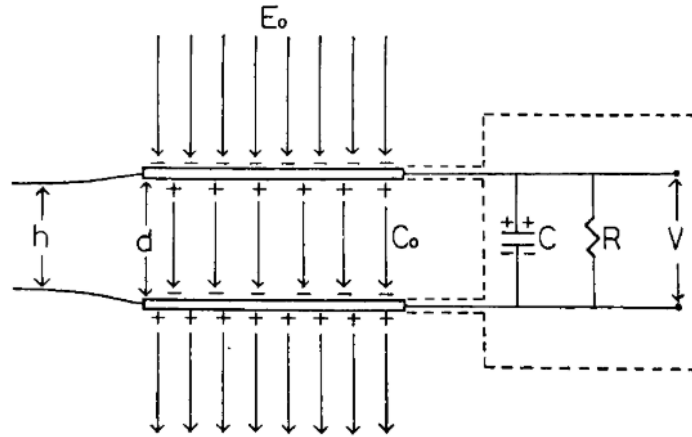


Figura 5.4: Sensor de placas paralelas. Tomado de [3]

Durante una tormenta eléctrica se presentan variaciones rápidas del campo que inducen cambios en la carga (corriente) en el plato sensible de la antena. La corriente generada es proporcional a la derivada del campo eléctrico,

$$I = \frac{dQ}{dt} = A\epsilon_0 \frac{dE}{dt} \quad (5.1)$$

donde, A es el área de la placa sensible y ϵ_0 la permitividad del vacío.

Teniendo en cuenta lo anterior, a la salida de la antena se implementa un circuito integrador compuesto por un condensador C y una resistencia R que genera una señal de voltaje V proporcional a la magnitud del campo eléctrico teniendo en cuenta la relación,

$$V = \frac{1}{RC} \int I dt = \frac{\epsilon_0 A E}{C} \quad (5.2)$$

Capítulo 6

Metodología

6.1. Revisión bibliográfica

El punto de inicio de la investigación se establece con una revisión bibliográfica, sobre trabajos existentes en el área, esto nos va a permitir afrontar el problema desde diferentes perspectivas e identificar puntos claves a tener en cuenta en el desarrollo del proyecto.

6.2. Selección de hardware

Después de haber establecido que variables tienen mayor relevancia en una tormenta eléctrica, se debe escoger un método de medición, y de transmisión de datos, seleccionando el hardware necesario para el funcionamiento de la estación siguiendo los lineamientos de tamaño, costo y consumo de energía.

6.3. Diseño de la arquitectura

Posteriormente de la selección del hardware, se diseña y construye una arquitectura que integre el hardware con una topología de transmisión eficiente de datos.

6.4. Construcción del prototipo

En esta etapa del proyecto se construirá el prototipo siguiendo una metodología escalonada, esto significa que se irá construyendo poco a poco de tal forma que se pueda realizar pruebas de cada parte de la estación por separado, luego se procederá a integrar el prototipo para las pruebas de funcionamiento conjunto.

6.5. Sistema de adquisición y transmisión

Uno de los objetivos del proyecto es la transmisión de los datos atmosféricos a un aplicativo, por lo que se procederá a implementar dicha característica mediante alguna tecnología de transmisión eficiente.

6.6. Prueba de funcionamiento y validación

Validar el funcionamiento de la estación juega un papel relevante en el presente proyecto, ya que garantizará que el producto soporta las condiciones ambientales a las que este expuesto durante el proceso de adquisición, la calidad y credibilidad de los datos.

6.7. Informe final

En este punto se va a realizar la integración de toda la información recolectada en cada fase y las conclusiones importantes en el informe final.

Capítulo 7

Cronograma de actividades

Para llevar a cabo los objetivos del proyecto, se hace un planteamiento de las actividades a realizar en el transcurso de los 8 meses que se definió como duración del proyecto de grado.

COMPLETADOS / PENDIENTES		MAYO				JUNIO				JULIO				AGOSTO				SEPTIEMBRE				OCTUBRE				NOVIEMBRE				DICIEMBRE				ENERO			
ITEM	ACTIVIDADES	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Estado del arte																																				
2	Documentación del proyecto																																				
3	Selección de hardware																																				
4	Diseño de la arquitectura																																				
5	Construcción del sensor de E lento																																				
6	Construcción del sensor de E rápido																																				
7	Diseño de estructura mecánica																																				
8	Sistema de adquisición y transmisión																																				
9	Desarrollo de pagina WEB																																				
10	Prueba de funcionamiento y validación																																				
11	Informe final																																				

Figura 7.1: Cronograma de actividades.

Capítulo 8

Recursos e Infraestructura

8.1. Recursos Humanos

Función	Descripción
Director	Decide sobre los recursos, determina y asigna las tareas.
Codirectores	Deciden sobre los recursos, riesgos del proyecto y asignan tareas.
Autores	Estudiantes de Ingeniería Electrónica encargados de investigar, documentar y desarrollar el proyecto de grado.

Tabla 8.1: Recursos Humanos.

8.2. Materiales

La siguiente lista de materiales se va a solicitar a la universidad por medio del grupo de investigación GIRG y se encontrarán disponibles en el laboratorio del grupo Halley para su uso.

Cantidad	Descripción
3	Sensor de presión atmosférica LPS35HW
3	Sensor de campo eléctrico
3	Sensor de temperatura MCP9808
3	Sensor de lluvia RG11
3	Sensor de rayos AS3935
2	Raspberry pi 3 modelo b+
2	Sensor de rayos
2	ADC
3	Arduino nano
2	Caja hermética
3	Transmisor IoT
3	Cámara raspberry
3	Anemómetro
5	Baterías de Litio

Tabla 8.2: Materiales

8.3. Equipos

Cantidad	Descripción
1	Osciloscopio Tektronix TBS 2000 Series Digital
1	Multímetro Digital MASTECH MY68 DMM
1	Fuente DC Dual 6060 PeakTech
1	Equipos de soldadura
1	Herramientas Varias

Tabla 8.3: Equipos

Bibliografía

- [1] Bing Zhao, Daihui Huang, and Zhou. Effects of thunders-torms electric field on intensities of positrons, electrons and photons at daocheng. In *36th International Cosmic Ray Conference (ICRC2019)*, volume 36, 2019.
- [2] Ibrahim et. al. Measurement of vertical electric fields from lightning flashes using parallel plate antenna. In *International Conference on Electrical, Control and Computer Engineering 2011 (InECCE)*, pages 466–471. IEEE, 2011.
- [3] T. Ogowa. Analyses of measurement techniques of electric field and currents in the atmosphere. 1973.
- [4] M. Spurio. *Particles and Astrophysics*. Springer International Publishing, 2015.
- [5] R. Kaiser. Muography: overview and future directions. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 377(2137):20180049, 2018.
- [6] Jun-Fang Wang and Qie. Effect of thunderstorm electric field on intensity of cosmic ray muons. 2012.
- [7] Alexeenko et. al. Transient variations of secondary cosmic rays due to atmospheric electric field and evidence for pre-lightning particle acceleration. *Physics Letters A*, 301(3-4):299–306, 2002.

- [8] Bartoli et. al. Observation of the thunderstorm-related ground cosmic ray flux variations by argo-ybj. *Physical Review D*, 97(4):042001, 2018.
- [9] MacGorman et. al. *The electrical nature of storms*. Oxford University Press on Demand, 1998.
- [10] T.C. Marshall, M Stolzenburg, and Maggio. Observed electric fields associated with lightning initiation. *Geophysical research letters*, 32(3), 2005.
- [11] L. P. Dwyer. Low-energy electron production by relativistic runaway electron avalanches in air. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 116(A9), 2011.
- [12] L. Dorman. *Cosmic rays in the Earth's atmosphere and underground*, volume 303. Springer Science & Business Media, 2013.
- [13] J. Marteau and D. Gibert. Muons tomography applied to geosciences and volcanology. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 695:23 – 28, 2012. New Developments in Photodetection NDIP11.
- [14] R. Colalillo. TGE at UHECR energies. In *Thunderstorms and Elementary Particle Acceleration (TEPA-2019)*, 2019.