



Dissertação

Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

***“CONTRIBUCIÓN PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE
UNA RED DE DETECCIÓN DE RAYOS EN ECUADOR”***

Karla Isabel Verdugo González

Leiria, Outubro de 2017



Dissertação

Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

***“CONTRIBUCIÓN PARA LA IMPLEMENTACIÓN
DE UNA RED DE DETECCIÓN DE RAYOS EN
ECUADOR”***

Karla Isabel Verdugo González

Disertación de Maestría realizada bajo la orientación del Doctor Luis Miguel Igreja Aires, Profesor de la Escuela Superior de Tecnología y Gestión del Instituto Politécnico de Leiria y orientación del Ingeniero Hernando Efraín Merchán Manzano, MSc, Profesor de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Cuenca.

Leiria, *Octubre* del 2017.

Esta página fue intencionalmente dejada en blanco

Dedicatoria

Los resultados de este proyecto, están dedicados a todas aquellas personas que de alguna forma son parte de su culminación. Dedico esta tesis a Dios y a mi familia. A Dios porque ha estado conmigo a cada paso que doy, cuidándome y dándome fortaleza para continuar, a mi familia pilares fundamentales en mi vida, quienes a lo largo de mi vida me han apoyado en cada decisión. Depositando su entera confianza en cada reto que se me presentaba sin dudar ni un solo momento en mi inteligencia y capacidad. Es por ello que soy lo que soy ahora. Los amo con mi vida.

Karla

Esta página fue intencionalmente dejada en blanco

Agradecimientos

Agradezco a Dios por la oportunidad que he tenido de aprender, mejorar y de crecer profesionalmente.

Quiero expresar mi sincero agradecimiento al Dr. Luis Aires y al Ing. Hernando Merchán, por su importante aporte y participación activa en el desarrollo de esta tesis, pues gracias a su apoyo, confianza en mi trabajo y sobre todo su capacidad para guiar mis ideas ha sido clave del buen trabajo que hemos realizado juntos. Debo destacar, por encima de todo, su disponibilidad, por sus siempre atentas y rápidas respuestas a las diferentes inquietudes surgidas durante el progreso de este trabajo, lo cual se ha visto también reflejado en los buenos resultados obtenidos.

Finalmente, a la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación por la beca cofinanciada en el Instituto Politécnico de Leiria. A la Universidad de Cuenca por la oportunidad y al Instituto Politécnico de Leiria por excelente calidad de educación y la acogida brindada.

Muchas gracias.

Esta página fue intencionalmente dejada en blanco

Resumen

Debido a la falta de sistemas de información sobre la ocurrencia de descargas atmosféricas en el país, se presenta el punto de partida para una futura implementación de una red de detección de rayos en el Ecuador, mediante un análisis de los diferentes parámetros directos o indirectos que influyen en la generación de las descargas atmosféricas.

Se ha tomado como referencia, los indicadores para la ocurrencia de rayos en Ecuador así como la demografía e zonas sensibles a proteger, con el fin de identificar los lugares adecuados para la colocación de los sensores y así detectar de manera eficiente el campo electrostático generado por una nube de tormenta. Para ello se utilizó información técnica de sensores existentes en el mercado para determinar los más idóneos al momento de estructurar la red. Finalmente se presenta dos propuestas de red (caso óptimo, menor costo) para luego hacer un análisis técnico-económico y presentar la mejor opción.

Palabras clave

Campo eléctrico, Campo electromagnético, Rayos, Sensor de rayos.

Esta página fue intencionalmente dejada en blanco

Abstract

Due to the lack of information systems on the occurrence of atmospheric discharges in the country, this work presents the starting point for a future implementation of a lightning detection network in Ecuador through an analysis of the different direct or indirect parameters that influence the generation of atmospheric discharges.

It was taken as reference, the indicators for the occurrence of lightning in Ecuador as well as the demography and sensitive areas to be protected, in order to identify the suitable places for the placement of the sensors and thus to detect in an efficient way the electrostatic field generated by a storm cloud. For this purpose, technical information on existing sensors in the market was used to determine the most suitable ones when structuring the network. Finally, two network proposals (optimal case, lower cost) are presented and then a technical-economic analysis is presented and the best option is presented.

Keywords:

Electric field, Electromagnetic field, Rays Sensor.

Esta página fue intencionalmente dejada en blanco

Lista de figuras

ILUSTRACIÓN 1.1 MAPA MUNDIAL DE WWLLN COMPORTAMIENTO DE LAS DESCARGAS.....	3
ILUSTRACIÓN 1.2 DESCRIPCIÓN DEL SEGUIMIENTO DE LA ACTIVIDAD TORMENTOSA A NIVEL MUNDIAL.....	4
ILUSTRACIÓN 1.3 ACTIVIDAD TORMENTOSA SOBRE IMÁGENES INFRARROJAS.....	4
ILUSTRACIÓN 1.4 NIVEL CERÁUNICO MUNDIAL.....	5
ILUSTRACIÓN 2.1 DESPLAZAMIENTO DEL LÍDER EN LA ATMÓSFERA.....	10
ILUSTRACIÓN 2.2 CARACTERÍSTICA DEL CORTOCIRCUITO DE UNA DESCARGA ATMOSFÉRICA.....	12
ILUSTRACIÓN 2.3. PROCESO DE UNA DESCARGA NUBE – TIERRA.....	14
ILUSTRACIÓN 2.4 CICLO DE VIDA DE UNA TORMENTA ELÉCTRICA.....	15
ILUSTRACIÓN 2.5 ETAPAS DE UNA TORMENTA ELÉCTRICA.....	17
ILUSTRACIÓN 2.6 FRENTE DE ONDA DE UNA DESCARGA ATMOSFÉRICA.....	19
ILUSTRACIÓN 2.7 TIPOS DE DESCARGA PARA UN CUMULONIMBUS.....	21
ILUSTRACIÓN 2.8 DESCARGAS DE POLARIDAD ASCENDENTE Y DESCENDENTE.....	22
ILUSTRACIÓN 2.9 VARIACIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO EN BUEN TIEMPO.....	22
ILUSTRACIÓN 2.10 VARIACIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO AL APROXIMARSE UNA NUBE DE TORMENTA.....	23
ILUSTRACIÓN 2.11 VARIACIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO AL MOMENTO DE UNA TORMENTA.....	23
ILUSTRACIÓN 3.1 LOCALIZACIÓN DEL ECUADOR.....	27
ILUSTRACIÓN 3.2 DIVISIÓN TERRITORIAL DEL ECUADOR.....	28
ILUSTRACIÓN 3.3 DENSIDAD POBLACIONAL (HAB/KM ²) EN EL ECUADOR.....	29
ILUSTRACIÓN 3.4 PROYECCIÓN DE LA POBLACIÓN ECUATORIANA (INEC).....	30
ILUSTRACIÓN 3.5 FENÓMENO CLIMÁTICO EL NIÑO.....	32
ILUSTRACIÓN 3.6 MAPA DE CLIMAS EN EL ECUADOR.....	33
ILUSTRACIÓN 3.7 MAPA DE PRECIPITACIÓN MENSUAL EN EL ECUADOR.....	34
ILUSTRACIÓN 3.8 MAPA DE PRECIPITACIÓN ANUAL EN EL ECUADOR.....	34
ILUSTRACIÓN 3.9 MÁXIMO VALOR DE PRECIPITACIÓN PRESENTADO EL MES DE ENERO EN EL PAÍS.....	35
ILUSTRACIÓN 3.10 MAPA DE LA TEMPERATURA EN EL ECUADOR.....	36
ILUSTRACIÓN 3.11 DESCARGAS ANUALES POR KM ² SEGÚN EL SATÉLITE LIS, PERIODO ABRIL 1995 –FEBRERO 2003.....	37
ILUSTRACIÓN 3.12 NIVEL CERÁUNICO EN ECUADOR.....	38
ILUSTRACIÓN 3.13 NÚMERO DE MUERTES A CAUSA DE LOS RAYOS EN LATINOAMÉRICA.....	39
ILUSTRACIÓN 3.14 NÚMERO DE MUERTES A CAUSA DE LOS RAYOS EN ECUADOR (2014-2016).....	40
ILUSTRACIÓN 4.1 UBICACIÓN DE LOS SENSORES EN ECUADOR.....	42
ILUSTRACIÓN 4.2 UBICACIÓN DEL SENSOR EN LA PROVINCIA DE MANABÍ	43
ILUSTRACIÓN 4.3 UBICACIÓN DEL SENSOR EN LA PROVINCIA DE GUAYAS.....	44
ILUSTRACIÓN 4.4 UBICACIÓN DEL SENSOR PROVINCIA DE PICHINCHA.....	46
ILUSTRACIÓN 4.5 UBICACIÓN DEL SENSOR PROVINCIA DE COTOPAXI.....	46
ILUSTRACIÓN 4.6 UBICACIÓN DEL SENSOR PROVINCIA DEL AZUAY, CENTRO DE LA CIUDAD DE CUENCA.....	47

ILUSTRACIÓN 4.7 UBICACIÓN DEL SENSOR PROVINCIA DEL AZUAY.	47
ILUSTRACIÓN 4.8 UBICACIÓN DEL SENSOR PROVINCIA DEL AZUAY.	48
ILUSTRACIÓN 4.9 UBICACIÓN DEL SENSOR PROVINCIA DE SUCUMBÍOS.	49
ILUSTRACIÓN 4.10 UBICACIÓN DEL SENSOR PROVINCIA DE PASTAZA.	49
ILUSTRACIÓN 4.11 UBICACIÓN DE LOS SENSORES EN ECUADOR.	50
ILUSTRACIÓN 4.12 DISTRIBUCIÓN DE LOS SENSORES QUE CONFORMAN LA RED NLDN EN ESTADOS UNIDOS.	51
ILUSTRACIÓN 4.13 COOPERACIÓN DE PAÍSES EUROPEOS QUE CONFORMAN LA RED EUCLID.	52
ILUSTRACIÓN 4.14 MAPAS DE ACTIVIDAD ATMOSFÉRICA REPORTADOS POR LA RED WWLLN.	53
ILUSTRACIÓN 4.15 COBERTURA DE LA RED LINET EN COLOMBIA.	54
ILUSTRACIÓN 4.16 COMPONENTES DE UNA RED.	57
ILUSTRACIÓN 4.17 UBICACIÓN DE LOS SENSORES PRIMERA PROPUESTA	59
ILUSTRACIÓN 4.18 UBICACIÓN DE LOS SENSORES SEGUNDA PROPUESTA.	60

Esta página fue intencionalmente dejada en blanco

Lista de tablas

TABLA 1 <i>SENSORES ACTUALMENTE EN EL MERCADO</i>	56
TABLA 2 COSTO DE LA PRIMERA PROPUESTA DE RED	59
TABLA 3. COSTO DE LA SEGUNDA PROPUESTA DE RED.....	60

Esta página fue intencionalmente dejada en blanco

Índice

Dedicatoria	IV
Agradecimientos	VI
Resumen	VIII
Abstract	X
Lista de figuras	XII
Lista de tablas	XV
Índice.....	XVII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Motivación Científica.....	1
1.2. Objetivos específicos de estudio	6
2. ESTADO DEL ARTE	7
2.1. Rayo Generalidades.....	7
2.1.1. Teoría de Simpson	8
2.1.2. Teoría de Elster y Geitel.....	8
2.1.3. Teoría de Wilson.....	9
2.2. Formación del Rayo	9
2.2.1. El Líder.....	10
2.2.2. El Rayo	11
2.2.3. Relámpago	12
2.2.4. Trueno	12
2.2.5. Fases en el proceso de descarga (rayo)	13
2.2.6. Ciclo de vida de las tormentas eléctricas	14
2.2.7. Ruta principal e impacto de retorno	16
2.3. Etapas de una tormenta eléctrica.....	17
2.4. Polaridad de los rayos.....	19

2.5.	Clasificación de los rayos	19
2.6.	Dirección de los rayos	21
2.7.	Variación del campo eléctrico durante una nube de tormenta.	22
2.8.	Parámetros de las descargas atmosféricas	24
3.	CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO	27
3.1.	Localización.....	27
3.2.	Geografía	27
3.3.	Demografía	28
3.4.	Clima	30
3.4.1.	Precipitación y temperatura.....	33
3.5.	Indicadores de ocurrencia de los rayos.....	36
3.5.1.	Base de datos del satélite LIS (Lightning Imaging Sensor)	37
3.5.2.	Nivel Cerámico en el Ecuador	38
3.5.3.	Zonas de ocurrencia de rayos - número de muertes a causa de los rayos.	39
4.	ESTUDIO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED DE DETECCIÓN DE RAYOS EN ECUADOR.....	41
4.1.	Generalidades.....	41
4.2.	Zonas para la ubicación de los sensores	41
4.2.1.	Región Costa.....	43
4.2.3.	Región Amazónica.....	48
4.3.	Redes de detección y localización de rayos a nivel mundial.....	50
4.4.	Clasificación de los dispositivos de detección.....	54
4.5.	Sensores disponibles en el mercado	55
4.6.	Propuesta de Red.....	57
5.	CONCLUSIONES	62
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64
7.	ANEXOS	68

Anexo1. Mapa Catastral Petrolero de Ecuador.....	69
Anexo2. Mapa de los proyectos desarrollados en el Ecuador	70
Anexo3. Mapa de la ubicación de los aeropuertos en Ecuador.	71
Anexo4. Mapa de la Red vial Estatal	72
Anexo5. Mapa del Sistema Nacional de Áreas Protegidas.	73
Anexo6. Mapa de las Estaciones Meteorológicas	74

Preámbulo

El trabajo tiene el propósito de contribuir al establecimiento de una red de detección de rayos en el Ecuador con sensores colocados en puntos geográficos estratégicos que permitan la medición del campo eléctrico ambiental y la captura de la radiación electromagnética generada por descargas atmosféricas. Se pretende tener la máxima cobertura y permitir la detección temprana de la presencia de una nube de tormenta electrificada y sus factores de riesgo inherentes.

Para este análisis se considera a las descargas atmosféricas como un fenómeno natural, de características físicas y eléctricas, que se da entre las nubes y entre una nube y tierra, debido a la presencia de una diferencia de potencial muy grande en la atmósfera. Este fenómeno tan antiguo, está al origen de muchos problemas en los sistemas eléctricos de transmisión y distribución de energía, provoca cuantiosas pérdidas de equipos eléctricos y electrónicos, destruye diversas estructuras y es el causante numerosas muertes de personas y animales.

El interés de obtener información útil para la protección de diferentes campos de la actividad económica, ya sea turismo, minería, petroleras, redes eléctricas, aeropuertos, industrias, etc.; y garantizar la seguridad de las personas en el evento de un rayo, justifica este trabajo. Se pretende aportar a la obtención, a través de la alerta temprana de una descarga, mediante la difusión de información y avisos meteorológicos siendo mecanismos de acción preventiva.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación Científica

Los rayos siempre estuvieron presentes en la historia de la humanidad. Es por ello que una de las manifestaciones más llamativas de las tormentas son las descargas eléctricas, generadas ya sea entre nubes o de nube a tierra. Benjamín Franklin¹ marcó un hito en la historia de la electricidad en el año de 1752. Como resultado de su experimento llegó a la conclusión que los rayos son descargas atmosféricas y posteriormente afirmó que la colocación de una punta metálica (pararrayos) en la parte superior de grandes estructuras atraería a los rayos para de esa manera ser conducidos a tierra y finalmente toda la estructura estaría protegida.

Sin embargo, se debe tomar en consideración que las descargas atmosféricas pueden causar grandes diferencias de potencial en sistemas eléctricos, edificios o estructuras protegidas, dando como resultado la circulación de grandes corrientes en las canalizaciones metálicas, pero aún sin la descarga, una nube cargada electrostáticamente crea diferencias de potencial en la tierra directamente debajo de ella. Partiendo de estas referencias y sabiendo que las descargas atmosféricas son fenómenos de la naturaleza absolutamente aleatorios, se mencionan los sucesos involucrados:

- Muerte de personas en zonas abiertas como: actividades agrícolas, ganaderas, pesqueras, al aire libre, competiciones, eventos multitudinarios, etc.
- Accidentes de aviación, incendios en pozos petroleros y embarcaciones.
- Daños en estructuras: puertos, aeropuertos, ferrocarriles, carreteras, autopistas, teleféricos, etc.
- Daños en sistemas eléctricos.
- Muerte de animales.

¹ **Benjamín Franklin** en 1752 llevó a cabo en Filadelfia su famoso experimento con la cometa, ató una cometa con esqueleto de metal a un hilo de seda, en cuyo extremo llevaba una llave metálica, haciéndola volar un día de tormenta, confirmó que la llave se cargaba de electricidad, demostrando así que las nubes están cargadas de electricidad y los rayos son descargas eléctricas.

- Provocar incendios o accidentes graves que involucren sustancias peligrosas (inflamables, radioactivas, tóxicas y explosivas).
- Interrupción en operaciones en las que se deba garantizar la continuidad de los servicios básicos: telecomunicaciones, generación, transporte y distribución de energía.

Luego de investigaciones, se concluyó que las corrientes producidas por los rayos deberían ser conducidas a tierra de forma controlada para minimizar los efectos destructivos.

Ahora bien, por seguridad y prevención es necesario una red de prospección de rayos que ayude con la detección anticipada de la formación de las tormentas disponiendo de información fiable y en tiempo real sobre su cercanía pues de esta manera permite tomar medidas de carácter temporal que eviten riesgos y asegurar los servicios de prioridad.

A nivel mundial se cuenta con una red de localización de rayos o WWLLN (World Wide Lightning Location Network) en tiempo real que nos permite disponer de información global sobre las descargas atmosféricas. Estas redes de detección consisten en antenas y sensores ubicados en tierra o en satélites que perciben la presencia de las descargas de manera instantánea. En la actualidad se disponen de redes globales, supranacionales, nacionales, regionales y locales, tomando en cuenta que las primeras tienen una mayor cobertura en comparación con las últimas. Regularmente las redes globales tienen una baja resolución espacial, con errores de posicionamiento relativamente altos comparados con las redes regionales o nacionales. De igual forma, su eficiencia de detección es baja, es decir el porcentaje de rayos o descargas detectadas es regular respecto a las reales si la comparamos con las de las redes nacionales. Además de estas redes están las conformadas por una sola antena que básicamente informa de la existencia o no de descargas próxima a la antena receptora y con unos errores de posicionamiento grandes.

Ahora bien, la energía electromagnética irradiada por una descarga en una tormenta va desde algunos hertzios hasta cientos de hertzios en la banda de muy baja Frecuencia

(VLF). Con esta red de sensores de detección de “sferics”² se producen mapas regulares de la actividad de descargas sobre toda la tierra.

En la ilustración 1.1 se muestra un mapa mundial del presencia o densidad de las descargas detectadas 40 minutos antes de la hora nominal UTC para el día 25 de Septiembre de 2016, así como la ubicación de los sensores activos en la WWLLN los cuales están marcadas como estrellas rojas dentro de una circunferencia blanca. Las descargas se presentan mediante colores en el mapa, es decir de color azul para las más recientes ocurridas en los 10 minutos anteriores, con verde y amarillo las transcurridas entre los 30 – 40 minutos anteriores y la línea blanca sinusoidal marca el límite del día-noche, con la zona de día del globo en gris.

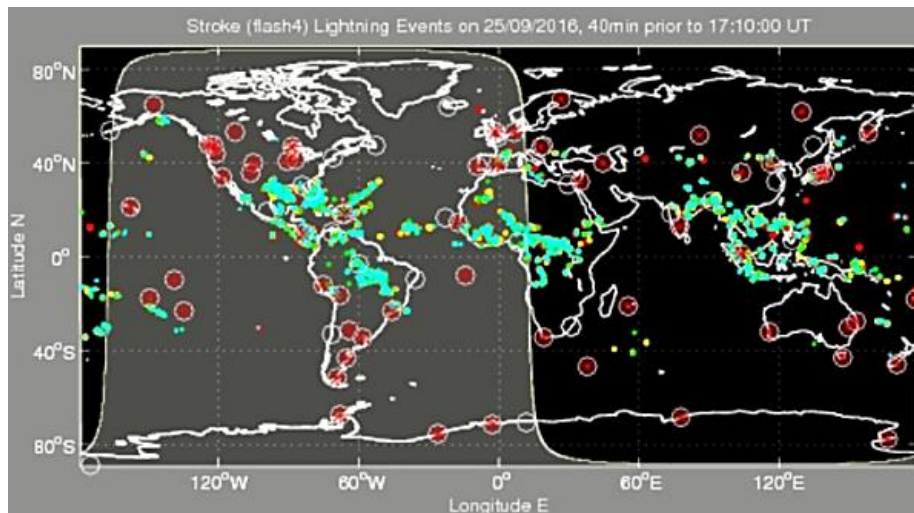


Ilustración 1.1 Mapa mundial de WWLLN comportamiento de las descargas.

Fuente: World Wide Lightning Location Network.

La red trabaja enviando información de todos los datos mundiales en un CD mensualmente a quienes forman parte del consorcio. Para la localización de la descarga es necesario un tiempo de llegada denominado TOGA (time of group arrival) mínimo de cuatro sensores de la red luego las diferentes antenas situados a grandes distancias detectan las señales de las esféricas para que después un concentrador de datos los estudie y utilizando una triangulación identifique la mejor posición de la tormenta como se presenta en la ilustración 1.2.

² La palabra “sferics” proviene de la palabra inglesa "atmospherics" en su versión corta y levemente modificada. Las esféricas o “sferics” son señales impulsivas emitidas por las descargas eléctricas terrestres.

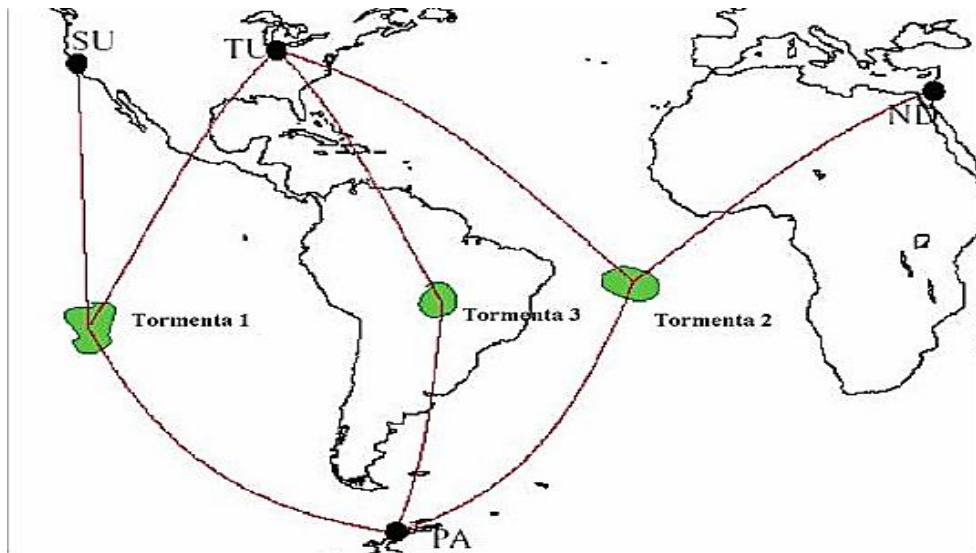


Ilustración 1.2 Descripción del seguimiento de la actividad tormentosa a nivel mundial.
Fuente: World Wide Lightning Location Network [1].

A la fecha quienes cuentan con esta red en su mayoría son países desarrollados, aunque cabe recalcar que hay países subdesarrollados en zonas tropicales donde se presentan con mayor frecuencia las descargas atmosféricas. En la ilustración 1.3 se puede observar cómo es el comportamiento a nivel mundial de las descargas atmosféricas reiterando que los puntos de color azul son las descargas presentadas recientemente y los de color rojo son las diferentes ubicaciones de los sensores con lo cual se consigue una mejor certitud al momento de interpretar las posiciones de los rayos.

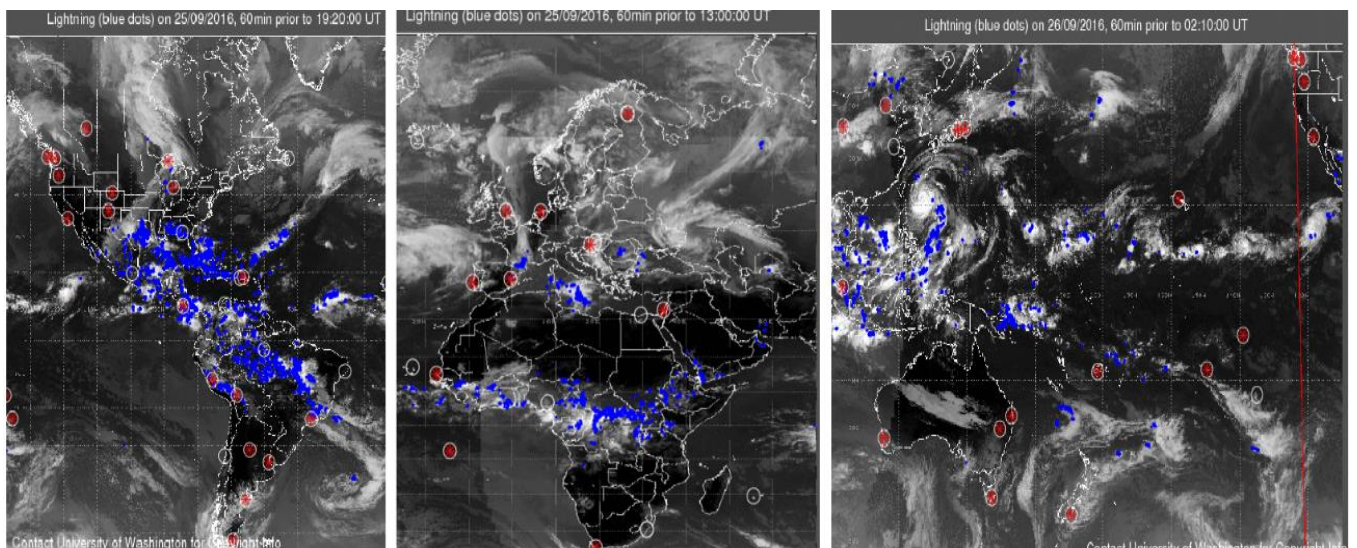


Ilustración 1.3 Actividad tormentosa sobre imágenes infrarrojas.
Fuente: World Wide Lightning Location Network [1].

Entre algunas de las características presentadas en la red WWLLN están las siguientes:

- El rango de frecuencias para las “sferics” va desde los 0 a los 24 kHz.
- La red detecta tanto los rayos o descargas nube tierra como los nube-nube.
- El umbral de detección según estudios realizados en EEUU, Brasil y Nueva Zelanda la red detecta entre el 5 y el 10% de todas las descargas con corrientes de pico mayores de 45 kA.

Finalmente, cabe recalcar una de las medidas que da a conocer la probabilidad de la caída de rayos en un lugar como por ejemplo, el numero promedio de días al año en los que hay tormentas considerando a estas como días en los que por lo menos se escuche un trueno, es decir el nivel cerámico con el cual se puede crear mapas que nos servirán como referencia sobre la ocurrencia de descargas en un lugar. En la figura 1.4 se presenta el mapa del nivel cerámico a nivel mundial.

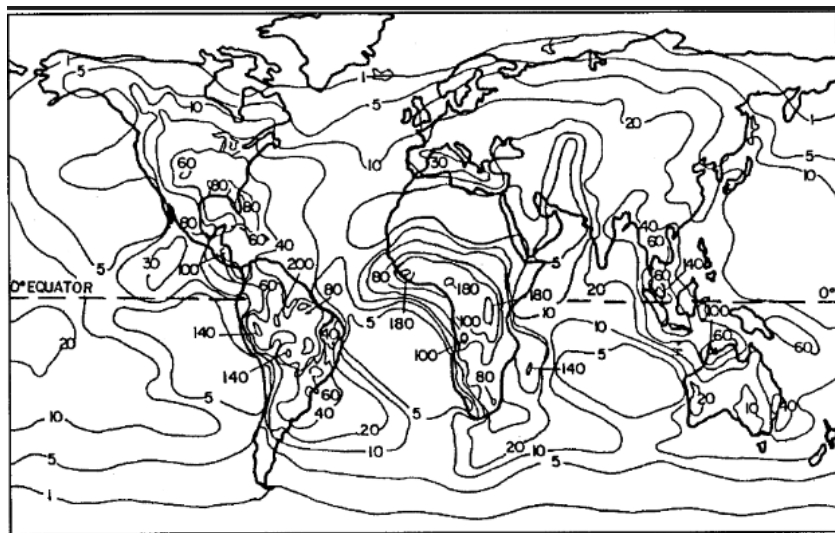


Ilustración 1.4 Nivel Cerámico mundial.

Fuente: Salinas Gatica Carlos Felipe [2].

Como se puede ver en la gráfica 1.4 el nivel cerámico del Ecuador es una cifra significativa, por esta razón el país necesita una Red de Detección que dé a conocer de manera fidedigna y temprana una tormenta eléctrica puesto que las redes globales existentes dan a conocer datos generales. Es por ello que la motivación de este estudio es dar una contribución científica importante en este propósito.

1.2. Objetivos específicos de estudio

- Estudiar de los mecanismos físicos y eléctricos de la generación e impactos de las descargas atmosféricas.
- Estudiar las características y magnitudes eléctricas y físicas de una descarga atmosférica.
- Conocer el desarrollo de los equipos y sistemas de prospección y detección de los rayos en diferentes lugares del planeta.
- Conocer en qué condiciones atmosféricas se generan las nubes eléctricas (cumulonimbos) en el Ecuador.
- Levantamiento de información de los lugares propicios para la ocurrencia de rayos, es decir zonas potenciales para la colocación de los sensores.
- Estudio y propuestas de una red de sensores distribuidos equilibradamente e interconectados con una red de transmisión.
- Análisis económico para su implementación.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Rayo Generalidades

La descarga eléctrica atmosférica es un fenómeno natural, que tiene mayor probabilidad de ocurrencia dependiendo de la estacionalidad del año y una gran variabilidad en cuanto a tipo e intensidad de la descarga. Entonces se puede decir que el rayo es una enérgica descarga natural de electricidad producida al momento de una tormenta, acompañado de un relámpago (emisión de luz) y por el sonido del trueno.

Si bien es cierto, existen indicadores que preceden la ocurrencia de los mismos, mas no es posible asegurar con certeza el momento, el lugar de impacto mucho menos la intensidad, tomando en consideración que las mediciones o estudios realizados son de gran ayuda en la realización de análisis estadísticos para luego poder hablar de la probabilidad de ocurrencia de las diferentes descargas.

Normalmente, los rayos son generados por partículas positivas en la tierra y negativas en las nubes de desarrollo vertical denominadas Cumulonimbos, cuando llegan a la tropopausa³ las cargas positivas de la nube atraen a las cargas negativas rompiendo la rigidez dieléctrica del aire y produciéndose la descarga.

Finalmente, la tierra puede ser considerada como un gigantesco condensador, cuyas placas estarían por la superficie del suelo y por la capa ionizada de Heaviside. Esta capa tiene una altitud promedio de aproximadamente 100 km, sobre su superficie se encuentra una capa de aire a la que se le denomina como el electrodo positivo [3]. Cuando las corrientes de aire entre la tierra y esta capa de aire producen una ionización alta, puesto que *“La conductividad de la atmósfera se debe a que existen iones se desplazan en el campo produciendo la corriente”*⁴ y consecuentemente se establece una descarga de

³ **La tropopausa** es la zona de transición entre la troposfera y estratosfera, situada entre unos 9 km de altura (polos) y los 17 (en el ecuador). Marca el límite superior de la troposfera, donde la temperatura generalmente decrece con la altura. A partir de la tropopausa la temperatura comienza a aumentar por la presencia de ozono y su interacción con la radiación ultravioleta procedente del sol.

⁴ Golup Geraldina T. /TORMENTAS ELÉCTRICAS, RAYOS Y PARARRAYOS/ 2002/ pág. 3

iones, es decir, el átomo pierde o gana electrones, y si su valor es elevado puede generarse una descarga eléctrica. Para un mejor entendimiento de este fenómeno, existen algunas teorías entre las más relevantes están las siguientes:

- Teoría de Simpson.
- Teoría de Elster y Geitel.
- Teoría de Wilson.

2.1.1. Teoría de Simpson

Esta teoría establece que las cargas eléctricas en las nubes se deben a las corrientes de aire que se encuentran en actividad en su interior, las corrientes de aire ascendentes trasladan vapor húmedo ya sea del mar o de la superficie del suelo, que al estar bajo ciertas condiciones ya sean atmosféricas o de altura se condensa formándose así las gotas de agua [4].

Luego cuando las gotas alcanzan un peso considerable descienden a la superficie terrestre por efectos gravitatorios, durante su caída se encuentran con corrientes de aire ascendentes las cuales provocan su división produciéndose así un bucle, es decir; continua el rompimiento de estas gotas formándose las cargas eléctricas pues se desprenden iones negativos que se distribuyen en la atmósfera y de igual forma son trasladadas por corrientes de aire hacia la parte inferior de la nube mientras que la parte superior se carga de forma inductiva [5].

2.1.2. Teoría de Elster y Geitel

Se basa en el campo eléctrico existente en las gotas, asumiendo que las nubes están cargadas de gotas grandes y pequeñas, además consideró que las gotas grandes se precipitan donde predominan las cargas negativas mientras que las pequeñas son llevadas por el viento hacia la parte superior de la nube. El roce entre una gota grande y pequeña conlleva a un intercambio de cargas [4].

Esta teoría se fundamenta en lo siguiente: *“si una gota grande de lluvia es expuesta a un campo eléctrico la gota se polariza en la parte superior por una carga negativa y*

*en la inferior por una positiva*⁵. Durante su descenso se encuentra con corrientes de aire las cuales provocan la disminución de su tamaño, luego la gota de tamaño reducido continua su caída hacia el suelo pudiéndose encontrar y hacer contacto nuevamente con otra gota de mayor tamaño dándose un intercambio de cargas; es decir, la primera gota aumenta su carga positiva en la parte inferior y la segunda gota sufre el mismo aumento de carga pero negativa en la parte superior. Este hecho se repetirá consecutivamente teniendo como resultado que la nube aumente su carga hasta llegar a un valor crítico que originará la descarga eléctrica [5].

2.1.3. Teoría de Wilson

La teoría de Wilson [4] señala que, para entender el origen de las descargas eléctricas en las nubes es necesario tomar en cuenta la rotura de las gotas de agua en una tormenta y por consiguiente la separación de su carga eléctrica respectiva debida a la acción de la gravedad terrestre y a las corrientes de aire ascendentes; además de tomar en cuenta el efecto del campo eléctrico existente puesto que *“una gota polarizada capta en su caída más iones negativos que positivos”*⁶.

En el proceso de la lluvia, las gotas tienen un rozamiento con los iones eléctricos presentes en el aire haciendo que se incremente la ionización de la atmósfera lo que hace más factible el recorrido del rayo ya sea hacia la tierra o hacia la nube.

2.2. Formación del Rayo

Las causas principales en la formación de los rayos pueden ir desde perturbaciones atmosféricas tales como: viento, presión y humedad hasta efectos producidos por el viento solar o la acumulación de partículas solares cargadas. Se considera que el hielo es el elemento primordial en la separación de las cargas positivas y negativas en la nube [6].

⁵ Gutiérrez Segura A. - Pérez Barrientos B. /Estudio sobre Protecciones contra Descargas Atmosféricas/2002/pág. 24

⁶ Ángeles Sánchez J. – Mora Galicia L. / IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO DE VOLUMEN DE COLECCIÓN PARA LA PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFÉRICAS EN LA TDGL POZA RICA /2010/ pág. 37

Además se debe considerar que los rayos pueden producirse en las nubes de cenizas de erupciones volcánicas o pueden ser causados por violentos incendios forestales que generan polvo capaz de crear carga estática lo que conlleva a la descarga eléctrica.

2.2.1. El Líder

Es la trayectoria que sigue una descarga eléctrica ya sea entre nube, de nube a tierra o de nube a nube, el mismo que esta antecedido por la formación de un canal guía o línea fuertemente ionizada por la presencia de iones en el aire. Este canal sirve de pauta para las posteriores ramificaciones que avanzan en forma de zigzag que se debe a la resistencia presentada por el aire y son más largas a medida que se acercan a la tierra, en sus descansos se observan puntos luminosos.

La resistencia del aire en estado estable se comporta como aislante y cuando existe presencia de descarga, esta se comporta como conductor a fin de que se rompa la rigidez dieléctrica de la misma. El proceso del líder se describe en la figura 2.1.

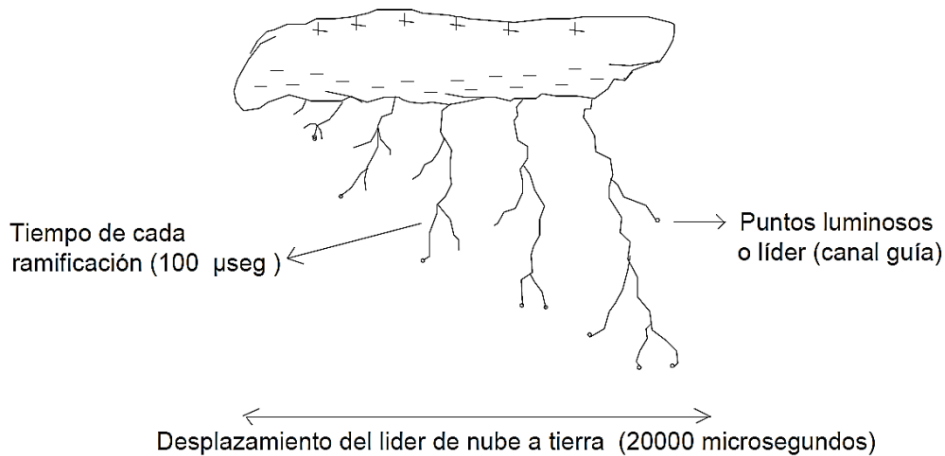


Ilustración 2.1 Desplazamiento del líder en la atmósfera.

Fuente: Tomas Laroj G. [6]

Entre las características más significativas que presenta el líder están las siguientes [3]:

- Temperatura: 25000 – 30000 °C
- Corriente: 3 – 200 kA
- Tiempo de duración: 1 – 100 ms

- Pendiente de Frente de Onda 7 – 400 kA/ μ s
- Diferencia de Potencial Nube – Tierra 100 MV
- Frecuencia 1 – 1000kHz
- Propagación 340 m/s

Es iniciado por un trazo inicial ascendente se forma cuando iones cargados negativamente, se elevan desde el suelo y se encuentran con iones cargados positivamente en una nube cumulonimbos⁷, luego el rayo vuelve a tierra como trazo.

2.2.2. El Rayo

El rayo [6], resulta del cortocircuito presentado entre la nube y la tierra cuando se rompe la rigidez dieléctrica de la atmósfera. Se origina cuando el campo eléctrico alcanza valores aproximados de entre 10.000 a 50.000 V/m dentro de la nube. Se genera cuando el gradiente de potencial eléctrico entre la base de la nube (carga negativa) y el crecimiento de la carga positiva en la superficie de la tierra, alcanza un valor del orden de 3 millones de V/m.

Cuando el líder se acerca a la superficie del suelo se genera un arco de tierra a nube, producido por la acumulación de la carga positiva en el suelo, luego el contacto de ambas cargas por el canal guía equivale al cortocircuito y en ese momento surge una corriente alta con una velocidad de 30 a 150 m/s superior a la del canal guía. Esta característica de la descarga atmosférica se describe en la figura 2.2.

⁷ **Cumulonimbos:** son nubes de gran desarrollo vertical, internamente formadas por una columna de aire cálido y húmedo que se eleva en forma de espiral rotatorio cuando están completamente desarrolladas suelen producir precipitaciones intensas y tormentas eléctricas. Su base suele encontrarse a menos de 2 km de altura mientras que la cima puede alcanzar unos 15 a 20 km de altitud.

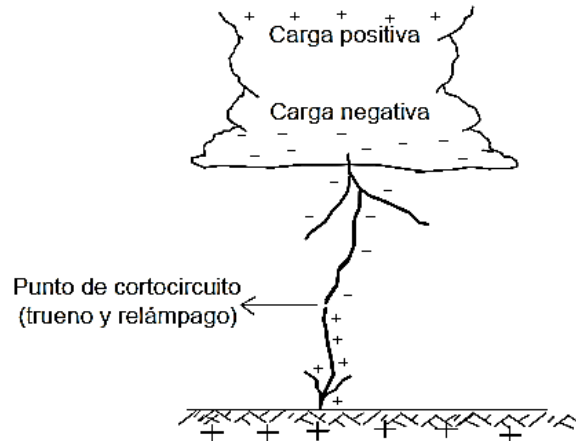


Ilustración 2.2 Característica del Cortocircuito de una descarga atmosférica.

Fuente: Tomas Laroj G. [6]

2.2.3. Relámpago

Es el aumento violento de la presión causada por el calentamiento de la atmósfera asociado con la descarga atmosférica, es el origen de luminosidad.

2.2.4. Trueno

Es el efecto producido por la brusca elevación de la presión de 2 a 3 atmósferas⁸ en el canal guía, contraída por las fuerzas electrodinámicas durante la duración de la descarga las cuales constituyen las ondas de sonido.

De igual forma es considerado como la onda de choque la que resulta del aire que se encuentra en la nube o desde la nube hacia la tierra a una temperatura superior a 28000°C lo que produce un calentamiento del rayo y conlleva a la ampliación de su volumen, para luego al expandirse a una gran velocidad y al mezclarse con el aire frío del ambiente baje su temperatura y se comprime, esta variación violenta es la generación de ondas de choque causantes del ruido del trueno.

⁸ La **unidad de presión atmósfera** equivale a la presión que ejerce la atmósfera terrestre al nivel del mar. Se ha utilizado para medir presiones elevadas, fue definida como igual a 101 325 Pa (Pascuales), corresponde a la presión de una columna de mercurio de 760 mm de altura a 0 °C, bajo la aceleración de la gravedad normal (9,80665 m/s²).

2.2.5. Fases en el proceso de descarga (rayo)

Se basan en una serie de hipótesis que definen el proceso de la descarga del rayo. Se definen cuatro fases de la descarga, estas son:

- **Primera fase:** pre descarga con la aparición de una radiación descendente, "líder", que se extiende desde la nube en dirección al suelo.

- **Segunda fase:** aparición de radiaciones eléctricas ascendentes, cuando la cabeza del líder descendente se aproxima al suelo. Generalmente estas radiaciones (o efluvios) surgen a partir de elementos que sobresalen de la superficie terrestre (árboles, chimeneas, antenas, pararrayos,...., etc.), consecuencia del *efecto punta*⁹.

- **Tercera fase:** creación de un canal ionizado entre la nube y el suelo cuando la cabeza del líder se une con los efluvios ascendentes. Se produce un cortocircuito entre la nube y la tierra que permite el paso de una corriente de alta intensidad, llamada descarga de retorno.

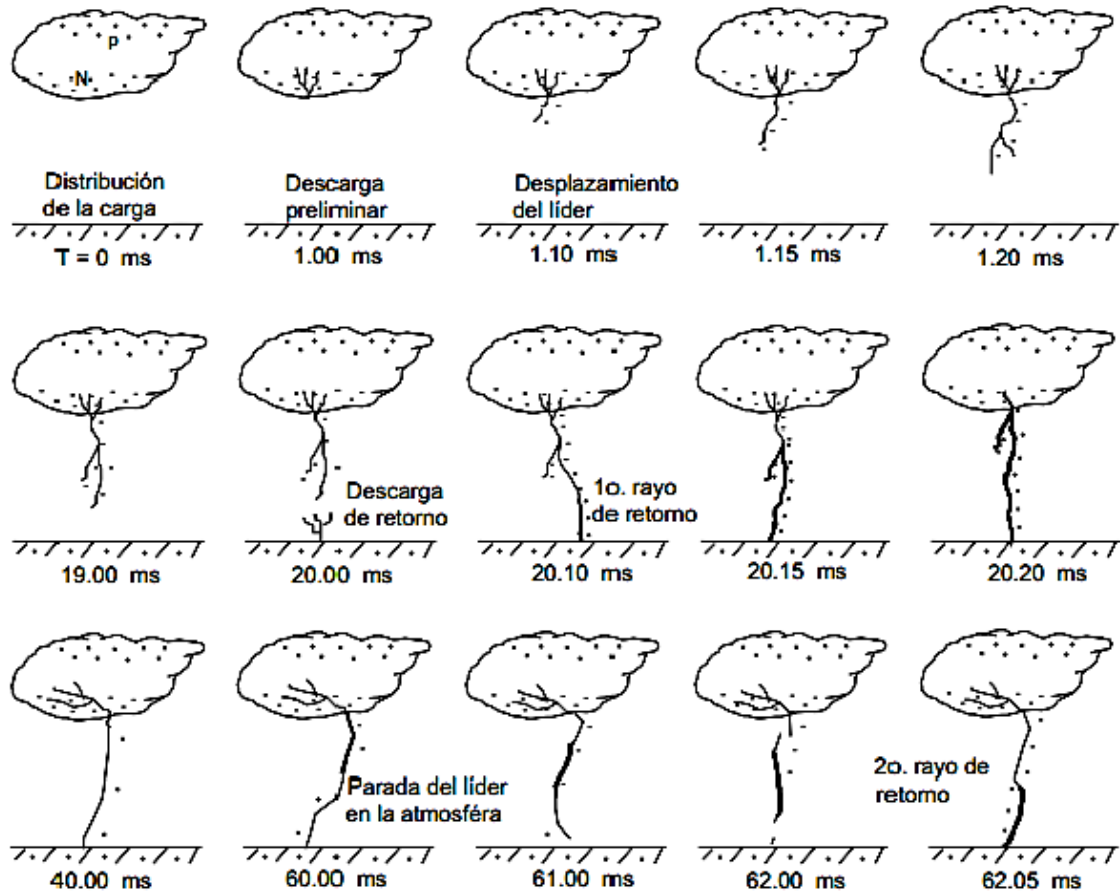
- **Cuarta fase:** se puede observar un trazado de gran luminosidad entre la nube y la tierra. Los electrones situados cerca del suelo son los primeros en sentir la conexión y acelerarse hacia abajo. En su recorrido hacia la tierra, el canal guía da un salto final hacia aquel objeto que está a una distancia de la cabeza del canal guía, igual a un valor que depende del potencial del líder y por lo tanto, de la intensidad de la descarga.

En conclusión el proceso completo del desarrollo del rayo consiste en el contacto de los precursores quienes crean un camino ionizado entre la nube y la tierra, en otras palabras el contacto entre el rayo descendente o líder de la nube con el rayo ascendente o líder potencial de tierra hasta llegar al punto en donde se produce un cortocircuito dándose su formación, luego en su progreso el rayo se desplaza en el aire buscando siempre la mayor conductividad y la mínima resistencia o regiones de mayor *humedad relativa*¹⁰ en

⁹ **Efecto Punta:** La densidad de carga es la carga por unidad de volumen o superficie en el cuerpo de manera que si la carga se distribuye en el cuerpo, su densidad será mayor en las zonas de menos volumen o menos superficie. Por esto se produce una acumulación de energía en las zonas del material acabadas en punta donde su volumen es menor y se concentra mayor cantidad de carga.

¹⁰ **Humedad relativa:** Es La cantidad de vapor de agua contenida en el aire, en cualquier momento determinado, normalmente es menor que el necesario para saturar el aire.

la atmósfera. En la figura 2.3 se muestra el proceso de una descarga de nube a tierra y los tiempos asociados al desenlace de la misma.



*Ilustración 2.3. Proceso de una descarga nube – tierra.
 Fuente: Rakov V. A. [7]*

2.2.6. Ciclo de vida de las tormentas eléctricas

La constante dinámica de las partículas al interior de las nubes y en conjunto con las teorías de electrificación, conllevan una variación temporal en formación, maduración y disipación de las tormentas eléctricas conocido como ciclo de vida [8].

Los autores Solomon, C. Adamo y M. Baker [9], mediante un modelo numérico, representó la evolución temporal de los centros de carga al interior de una nube de tormenta caracterizada como típica, y su frecuencia de actividad de rayos intra-nube y nube-tierra. Este comportamiento fue descrito en cinco periodos tal como se muestra en la Figura 2.4, los cuales se detallan a continuación.

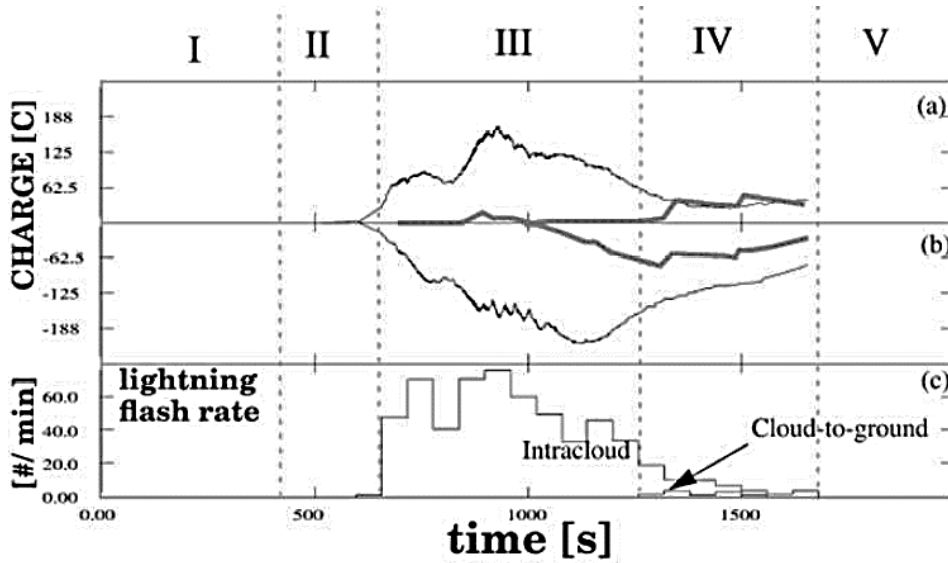


Ilustración 2.4 Ciclo de vida de una tormenta eléctrica.

Fuente: López Trujillo Jesús. [8]

Periodo I: El inicio del ciclo de vida de las tormentas o estado de cumulo, no presenta formación alguna en los centros de carga al interior de la nube.

Periodo II: Alrededor de 400 segundos después del proceso de formación, aparecen los primeros centros de carga. Al final del periodo generan un campo eléctrico suficiente para iniciar el proceso de neutralización de carga al interior de las nubes.

Periodo III: Este periodo se identifica por la continua generación y separación de carga eléctrica. Marca el inicio de una alta tasa de descargas intra-nube. En este periodo se especifican los centros de carga eléctrica.

Periodo IV: Una vez depositada la suficiente carga eléctrica en los centros de carga negativos y positivos, aparecen en conjunto con los rayos intra-nube.

Periodo V: Finalmente, una vez neutralizada gran parte de la carga eléctrica, gradualmente se va disipando la ocurrencia de descargas al interior de las nubes como la actividad a tierra, de igual forma el campo eléctrico producido por los centros de carga pierde intensidad.

Cada uno de los periodos previamente nombrados, en la actualidad es posible registrarlos de forma independiente o en conjunto mediante diversos dispositivos de medición, detallados en el capítulo 4.

2.2.7. Ruta principal e impacto de retorno

En una nube de tormenta, una carga eléctrica igual pero opuesta a la carga de la base de la nube se induce en la tierra por debajo de ella. El suelo con carga inducida sigue el movimiento de la nube manteniéndose por debajo, luego si el campo eléctrico es lo suficientemente fuerte una descarga electrostática¹¹ puede desarrollarse a partir de estas condiciones, esta hipótesis fue teorizada por Heinz Kasemir.

Pues a medida que el campo eléctrico aumenta, la corriente positiva puede convertirse en una ruta principal más grande y caliente que la actual, para finalmente llegar a la ruta principal de paso que desciende desde la nube. Es también posible que muchas corrientes se desarrollen a través de diferentes objetos simultáneamente, basta con que u-no haga contacto con el principal para posteriormente se forme la trayectoria de la descarga principal.

Una vez que el canal de aire ionizado se establece entre la nube y el suelo, se convierte en una ruta de menor resistencia, y permite una propagación de corriente mucho mayor desde la tierra a la nube. Este es el impacto de retorno y es el que más intensidad luminosa posee, siendo una de las partes más notables de la descarga del rayo.

La ruta de aire ionizado, empieza con una combinación de agua con carga negativa y una región de hielo en la nube de tormenta. Los canales de descarga ionizados son conocidos como rutas principales de paso, la mayoría de éstas superan los 45m de longitud. Las rutas principales cargadas positiva y negativamente avanzan en direcciones opuestas, las cargadas negativamente avanzan hacia abajo en una serie de saltos rápidos denominados pasos.

A medida que continúa el descenso, las rutas principales de paso pueden ramificarse en varios caminos, la progresión de las rutas principales de paso toma un tiempo relativamente largo en llegar al suelo (cientos de milisegundos). Esta fase inicial necesita de una pequeña corriente eléctrica (decenas o cientos de amperios), siendo ésta casi invisible, cuando se compara con el canal de rayos posterior. Luego, cuando una ruta

¹¹ **Descarga electrostática:** conocida también como corriente positiva es un fenómeno electrostático en el cual circula una corriente eléctrica repentina y momentáneamente entre dos objetos de distinto potencial eléctrico.

principal de paso alcanza el suelo, la presencia de cargas opuestas en el suelo mejora la potencia del campo eléctrico. Este es más fuerte en objetos en contacto con el suelo cuyas partes más altas están cercanos a la base de la nube de tormenta, como árboles o edificios altos.

2.3. Etapas de una tormenta eléctrica

En el transcurso de una tormenta eléctrica por lo general se presentan las fases [10] (Nacimiento, Madurez y Disipación) que se muestran en la figura 2.5:

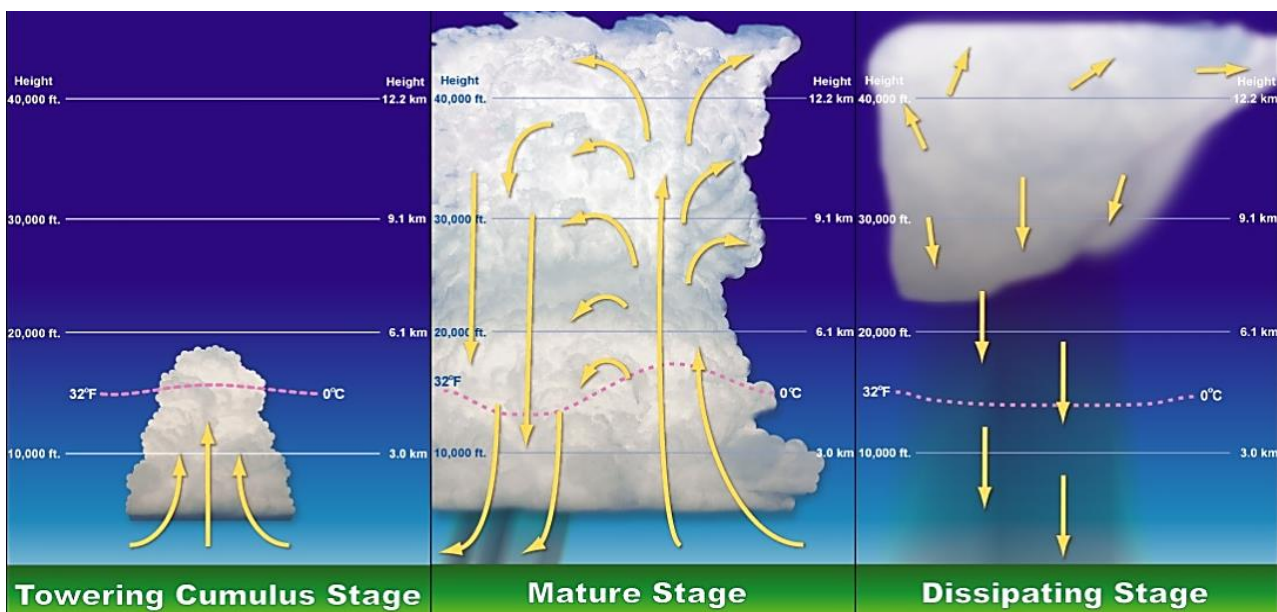


Ilustración 2.5 Etapas de una Tormenta Eléctrica.

Fuente: National Weather Service [11]

- **NACIMIENTO**

“El efecto combinado de la humedad y del recalentamiento local del suelo (tormentas de calor) o el encuentro de enormes masas de aire cuya temperatura y humedad son diferentes (tormentas ciclónicas) es la causa de la ascensión y crecimiento de la nube hasta alcanzar el equilibrio con el aire circundante (cerca de 12 km de altitud)”¹² originando la formación de cumulonimbos. De igual forma las tormentas por ascensión orográfica de aire caliente y húmedo en las montañas dado que el país cuenta con la cordillera de los Andes. Ahora bien, si la carga por primera vez es de agua y no se genera ningún rayo, no es considerada una tormenta eléctrica. Sin embargo, en la parte

¹² Merchán Manzano H. /PROGRAMA DE MATERIA DE ALTA TENSIÓN /CUARTO AÑO/ pág. 86

superior de la nube, el proceso de aumento de cristales de hielo empieza a originar las partículas.

- **MADUREZ**

Se presenta un crecimiento vertical que alcanza su máximo y las nubes se acoplan tomando la forma característica de un yunque, esto se da cuando es más estable el aumento de la temperatura del aire, es decir en la tropopausa.

En este caso los vientos en la altitud de las nubes *cirrus*¹³ empiezan a expandirse en la parte superior y los relámpagos se hacen presentes en toda la extensión de la nube, dentro de ella la turbulencia es fuerte pero con un equilibrio entre las corrientes ascendentes y descendentes lo cual no impide que las partículas de la precipitación empiecen a descender arrastrando con ellas el aire que las rodea.

Estas partículas descienden a las partes cálidas de la nube por lo que no hay aire seco presente, consecuentemente las partículas se pueden evaporar. La evaporación enfría el aire por lo que es más densa o pesada, luego todo ese aire frío cae a través de la nube y precipitación que se forma la corriente de aire hacia abajo, cuando llegue a la superficie se puede propagar y formar un frente que avanza desplazando y reemplazando el aire caliente de la superficie. En esta etapa de la tormenta produce fuertes vientos, relámpagos y lluvias torrenciales.

- **DISIPACIÓN**

Las nubes comienzan a extenderse hacia los lados, en capas o bordes. Y los vientos descendientes de las corrientes frías son predominantes. El aire frío reemplaza el aire más caliente de la superficie, frente a los movimientos al alza en la tormenta. En esta etapa, sólo hay corrientes descendentes y precipitaciones débiles. Eso deja sólo muchas nubes cirrus que incluso pueden contribuir, con su sombra, a frenar el calentamiento de la superficie.

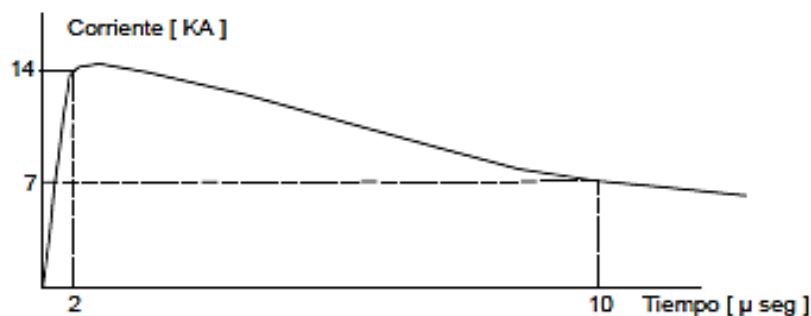
¹³ **Cirrus:** Surcan el cielo en forma de mechones blancos. Suelen estar por encima de los 5000 m de altura, están compuestas por millones de cristales de hielo que son arrastrados por los vientos de los niveles altos de la atmósfera, se mueven de oeste a este.

2.4. Polaridad de los rayos

Según el signo del *centro de carga*¹⁴ en la nube, la descarga por rayo puede ser de polaridad positiva o negativa. Estudios estadísticos [12], [13], [14], indican que el 80 a 90% de los rayos son negativos y el 10% son de polaridad positiva.

- **Rayo positivo:** Están formados por una sola descarga y su corriente tiene una duración del frente de onda de 20 a 50 microsegundos, con una amplitud que puede llegar a ser de 5 a 100 kA, hasta un máximo de 200 kA. Estas descargas por lo general caen en zonas montañosas.

- **Rayo negativo:** Está formado normalmente por varias descargas sucesivas. La primera de ellas está asociada con un frente de onda de 2 μ seg, como se muestra en la figura 2.6 y amplitud de corriente más débil comparada con los rayos positivos. Las estadísticas indican que el 90%, de los rayos negativos (nube-tierra), se descargan en zonas llanas y climas templados.



*Ilustración 2.6 Frente de Onda de una descarga atmosférica.
Fuente: Tomas Laroj G [6]*

2.5. Clasificación de los rayos

Los rayos se clasifican [6], en fríos y calientes, por las características que presentan los picos de alta intensidad es decir magnitud máxima de corriente, y tiempo corto de la presencia de las mismas, de la siguiente forma:

¹⁴ **Centro de carga en la nube:** Se ha comprobado que cuando se congelan soluciones diluidas de agua, se originan grandes diferencias de potencial eléctrico entre el agua y el hielo, mientras el hielo adquiere carga eléctrica negativa el agua retiene carga positiva se cree que la formación de los centros de carga en las nubes de tormenta tiene lugar cuando el granizo recoge más agua líquida de la que puede ser congelada al instante. Una vez que se inicia la solidificación, parte del agua que no pasa inmediatamente al estado sólido es arrastrada por la corriente vertical de aire.

- **Rayo frío:** dura alrededor de 10 ms, tiene una intensidad que varía entre 10 a 220kA, es el más frecuente en la atmósfera. A este rayo se atribuye el estallamiento de los árboles, ya que provoca su violento secado. Es por ello que se le conoce como el destructor de maderas y mampostería; además, es el causante de las sobretensiones y sobre corrientes en los sistemas eléctricos.

- **Rayo caliente:** Tienen la característica de poseer una intensidad cercana a los 100A, con una duración entre 100 y 200 veces más que el anterior, son los que producen la combustión de los materiales.

Ahora bien, las descargas atmosféricas tienen una gran variabilidad es por ello que se las puede catalogar en diferentes tipos como se muestra en la figura 2.7 pues presentan diferentes características como por ejemplo: la intensidad, ocurrencia, manifestaciones, etc. A continuación se presenta dicha clasificación:

- **Rayo de nube a tierra**

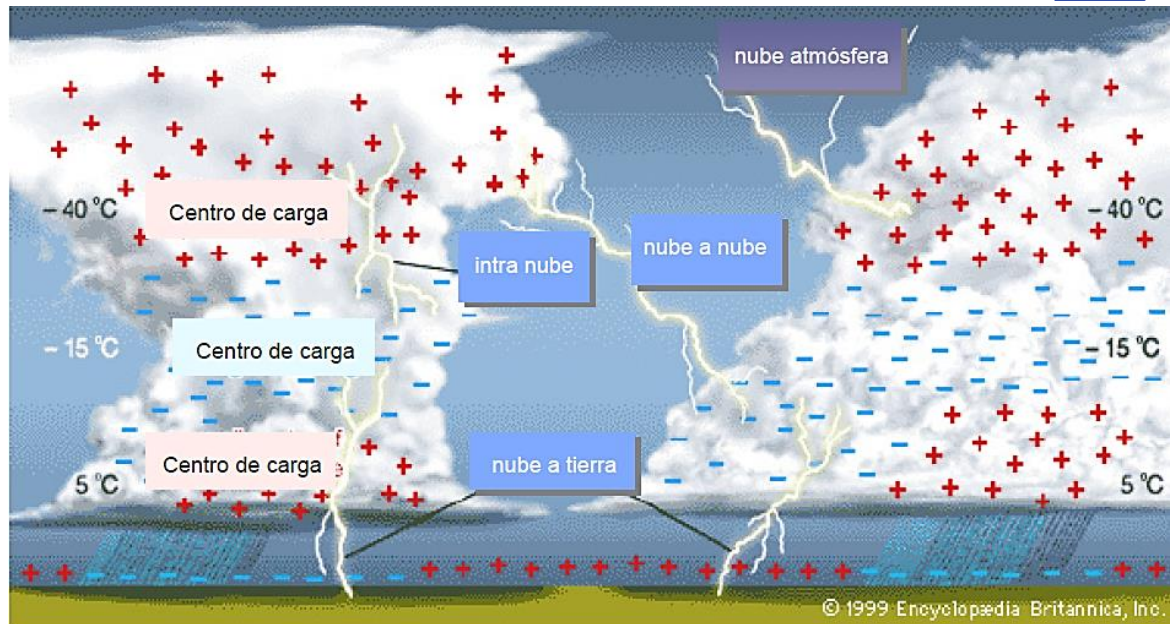
Es uno de los más comunes y conocidos ya que constituye una gran amenaza para las personas y estructuras pues su impacto es directo hacia la tierra desde la nube denominada cumulonimbos.

- **Rayo de tierra a nube**

Es iniciado por un trazo inicial ascendente se forma cuando iones cargados negativamente, se elevan desde el suelo y se encuentran con iones cargados positivamente en una nube cumulonimbos, luego el rayo vuelve a tierra como trazo.

- **Rayo de nube a nube**

Este tipo de rayos suelen generarse bien entre dos nubes separadas al cual se lo conoce como *rayo inter-nube* o cuando se produce entre zonas de diferente potencial eléctrico, dentro de la misma nube, se denomina *rayo intra-nube*, este es el tipo de descarga que ocurre con mayor frecuencia.



*Ilustración 2.7 Tipos de Descarga para un Cumulonimbus.
 Fuente: Hermoso Costa J. [15]*

2.6. Dirección de los rayos

La dirección de los rayos depende del avance del canal guía, cuando éste avanza de la nube a la tierra se denomina rayo descendente y cuando va al contrario se llama rayo ascendente. Estos pueden ser de polaridad negativa o positiva como se muestra en la gráfica 2.8, a continuación se presente algunas características de ellos:

- **Descendente negativo:** empieza en la nube con carga negativa y continua hacia la tierra (carga positiva).
- **Descendente positiva:** se inicia en la parte superior de la nube y contienen carga positiva que se dirige hacia la tierra en donde existen puntos de acumulación de carga negativa. Generalmente se muestran en los picos altos de las montañas y volcanes.
- **Ascendente positiva:** comienza sobre la tierra con carga positiva y se dirige a la base de la nube, se da en terrenos de mucha conductividad y humedad.
- **Ascendente negativa:** este rayo se inicia sobre la tierra con carga negativa y se dirige a la parte superior de la nube (carga positiva). Se presenta en los picos altos de las montañas o volcanes.

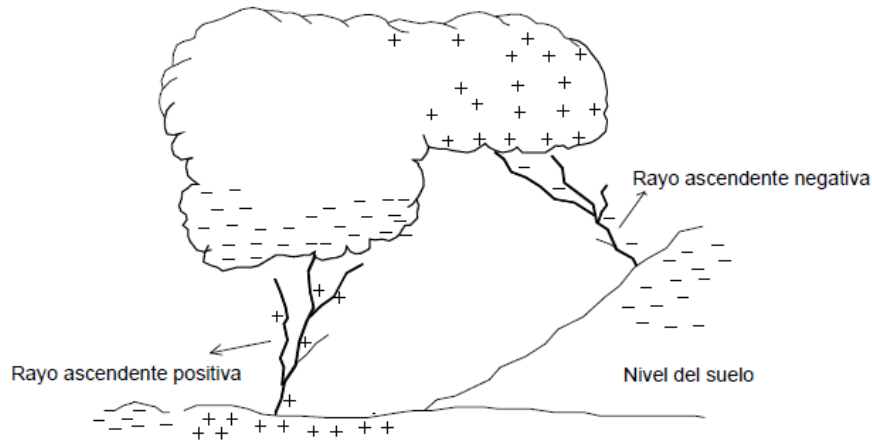


Ilustración 2.8 Descargas de Polaridad ascendente y descendente.
 Fuente: Tomas Laroj G [6]

2.7. Variación del campo eléctrico durante una nube de tormenta.

Bajo condiciones de buen tiempo, es decir cuando no estén presentes precipitaciones ni vientos, el campo eléctrico presente en la superficie terrestre tiene un valor aproximado de 120V/m con dirección positiva como se muestra en la ilustración 2.9.

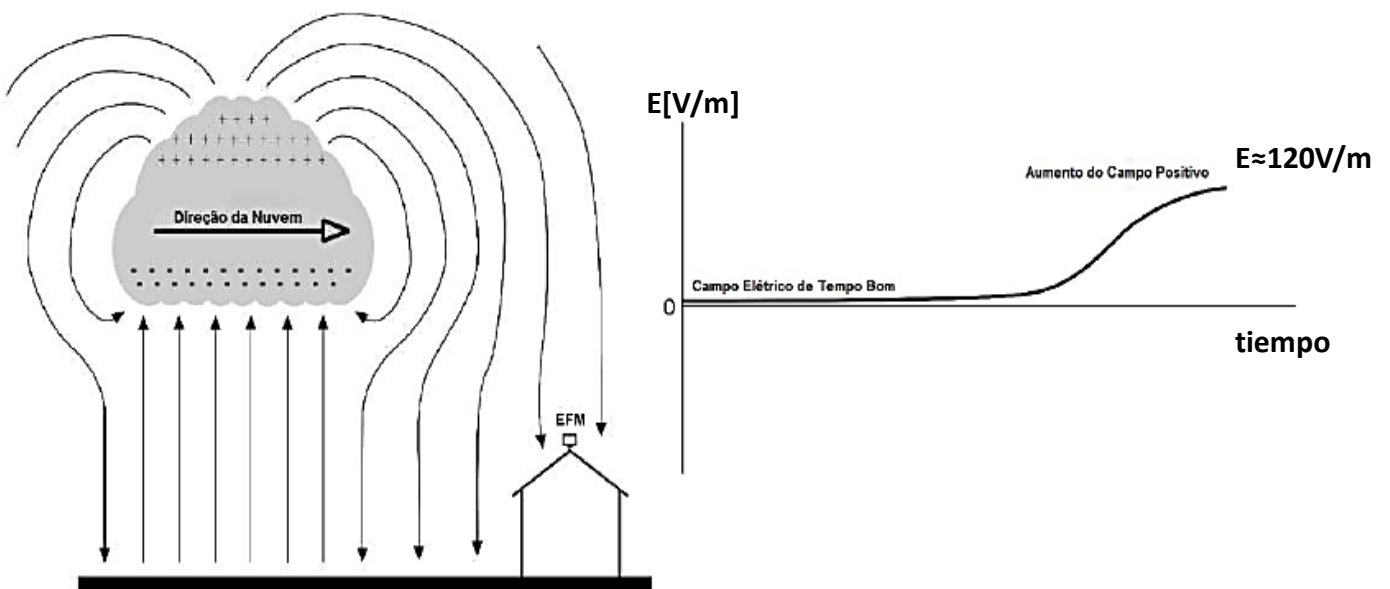


Ilustración 2.9 Variación del campo eléctrico en buen tiempo.
 Fuente: Flávio de Carvalho Magina [16].

A medida que las condiciones climáticas varían y la nube de tormenta se aproxima el campo eléctrico aumenta pero en este caso con sentido contrario, esto se debe a que las nubes de tormenta tienen centros de carga negativa los cuales inducen en la superficie terrestre (suelo) cargas positivas como se observa en la ilustración 2.10.

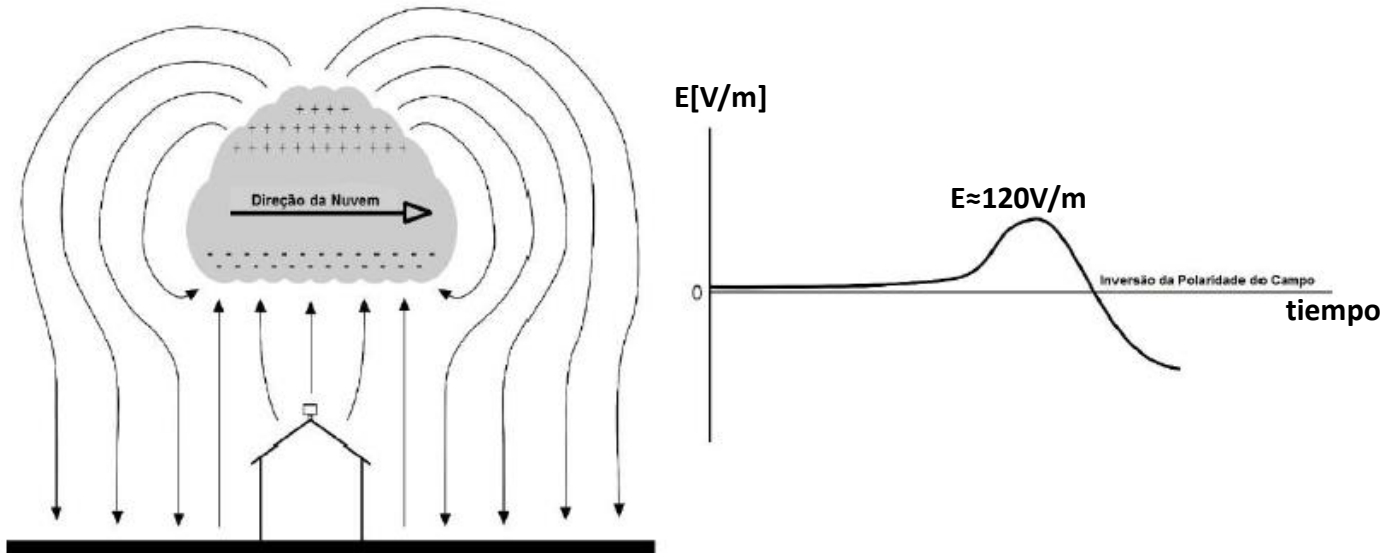


Ilustración 2.10 Variación del campo eléctrico al aproximarse una nube de tormenta.

Fuente: Flávio de Carvalho Magina [16].

Ahora bien, a continuación en la ilustración 2.11 se puede visualizar la variación del campo eléctrico al momento de la descarga, el mismo que puede alcanzar variaciones de entre $\approx 15 - 20$ kV/m hasta que luego se neutralicen las cargas y se establece nuevamente el campo eléctrico.

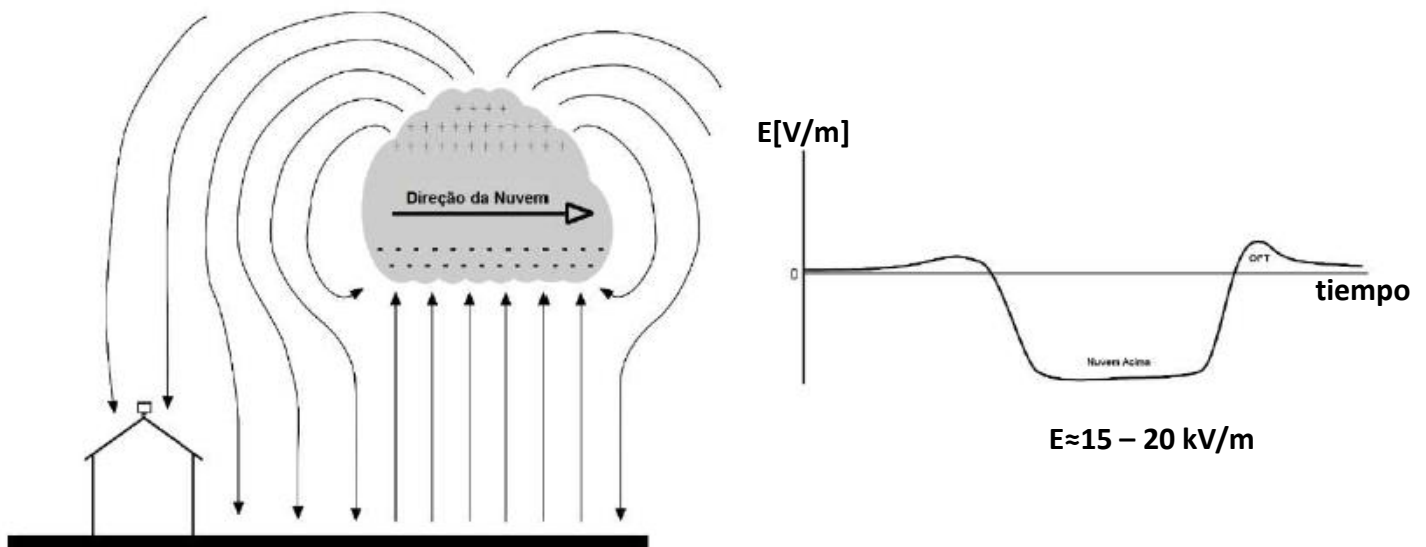


Ilustración 2.11 Variación del campo eléctrico al momento de una tormenta.

Fuente: Flávio de Carvalho Magina [16].

Cabe resaltar que mientras se produce la descarga atmosférica como ya se mencionó se generan corrientes muy grandes $\approx 20000^a$, las cuales que generan campos electromagnéticos. Es por ese motivo que se darán a conocer los sensores que nos serán de ayuda para medir tanto el campo eléctrico como el campo electromagnético presentes durante el proceso de la descarga.

2.8. Parámetros de las descargas atmosféricas

Los parámetros que aportan con un valor fijo relacionado con las descargas atmosféricas y que tiene mayor influencia son los detallados a continuación:

- **Nivel Cerámico:** Es el número de días del año en los que, por lo menos se escucha un trueno. Por ejemplo en algunos lugares de la tierra, el nivel cerámico puede tener una frecuencia igual a 300 días/año.
- **Densidad de rayos a tierra (DRT):** es el número de rayos a tierra por kilómetro cuadrado al año. Este valor es condescendiente al nivel cerámico pues ayuda a ponderar la incidencia de descargas en una zona.
- **Polaridad del rayo:** signo de las cargas transferidas. Normalmente son electrones, pero en algunos casos pueden transferirse cargas positivas.
- **Impedancia del canal:** La nube y la tierra son consideradas como placas de un condensador que se descarga por un canal con una impedancia considerada como inductiva debido a que la formación del canal precisa de un lapso de tiempo.
- **Corriente de pico:** determina el gradiente máximo de corriente de rayo o pico más alto de la forma de onda, este resultado es importante para el diseño de protección contra rayos.
- **Gradiente máximo de corriente del rayo:** es el valor utilizado para el cálculo de tensiones electromagnéticas inducidas en cualquier instalación eléctrica y es el causante de daños en equipos electrónicos.

- **Energía liberada por el rayo:** esta puede ser del orden de 50 a 250 kWh o 3000 Julios (J). Finaliza en un tiempo de 100-300 milisegundos y adquiere el pico máximo en solo 1 o 2 microsegundos.
- **Impedancia del rayo:** la impedancia viene determinada por la rigidez dieléctrica del aire que opone una resistencia al paso de la corriente, la cual se debe a las partículas y a los gases contenidos en la atmósfera. De estudios estadísticos se ha determinado una impedancia esta alrededor de 900 a 2000 Ω /rayo.
- **Masa de aire:** Esta definida como un volumen de aire de gran extensión aproximadamente miles de km², donde sus propiedades físicas como temperatura y humedad son uniformes.
- **Frente Frío:** Ocurre cuando una masa de aire frío se traslada hacia latitudes menores y su parte delantera de cierta forma encaja entre el suelo y el aire caliente lo cual produce descensos bruscos de temperatura en esa área. Este puede generar perturbaciones en la atmósfera como, tormentas, truenos, chubascos, tornados, vientos fuertes, etc.

Un frente frío y su masa de aire pueden generar lluvias, granizo, descenso brusco de temperatura, heladas, nevadas, vientos fuertes, viento del norte, así como tormentas invernales las cuales están acompañadas de condiciones secas a medida que el frente avanza. Dependiendo de la época del año y de su localización geográfica, los frentes fríos pueden venir en una sucesión de 5 a 7 días.

Esta página fue intencionalmente dejada en blanco

3. CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

3.1. Localización

Ecuador, es un país latinoamericano localizado en la parte noroccidental de Sudamérica limita al norte con Colombia, al sur y al este con Perú. El océano Pacífico rodea la costa y al oeste se encuentran las Islas Galápagos que están ubicadas a aproximadamente 1000 km de la Costa como se observa en la figura 3.1.



*Ilustración 3.1 Localización del Ecuador.
Fuente: Ecuadortouristique [17]*

3.2. Geografía

La cordillera de los Andes divide el territorio de norte a sur, dejando a su límite occidental el golfo de Guayaquil (Costa) y una llanura boscosa el oriente (Amazonía) como se ve en la figura 3.2. El país tiene un área de 283 561 km², con 16.776.977 de habitantes según el INEC¹⁵.

¹⁵ INEC: Instituto Nacional de Estadísticas y Censos.

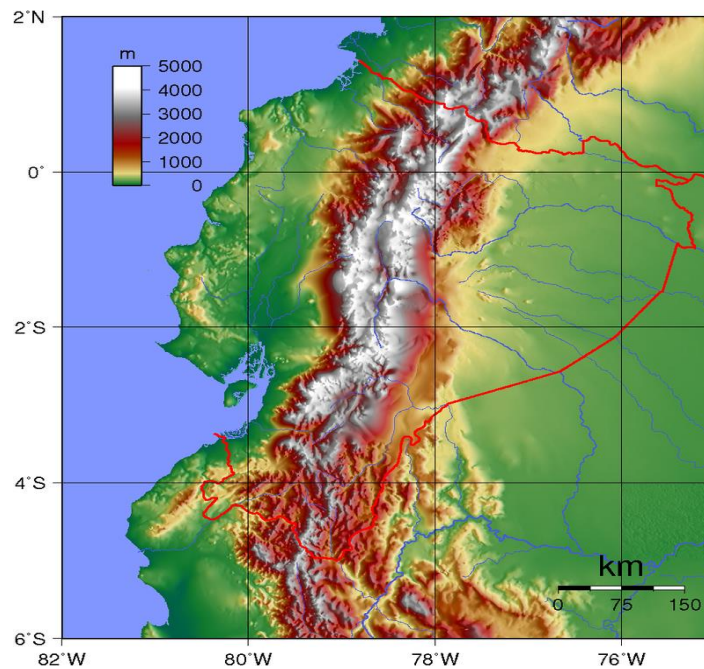


Ilustración 3.2 División territorial del Ecuador.
Fuente: Wikipedia [18]

Como se mencionó la Cordillera Andina cruza el territorio ecuatoriano de norte a sur la cual se encuentra unida por varias eminencias transversales que forman hoyas o cuencas hidrográficas con valles interiores. Las tierras llanas y bajas se encuentran al occidente mientras que en el oriente existe una extensa región rodeada de selvas.

3.3. Demografía

La población del Ecuador para el año 2015 según [19] asciende a 16.320.179 personas, con la más alta densidad poblacional de América del Sur, teniendo 56,5 habitantes por km². En la ilustración 3.3 se presenta la densidad poblacional por parroquias en el país.

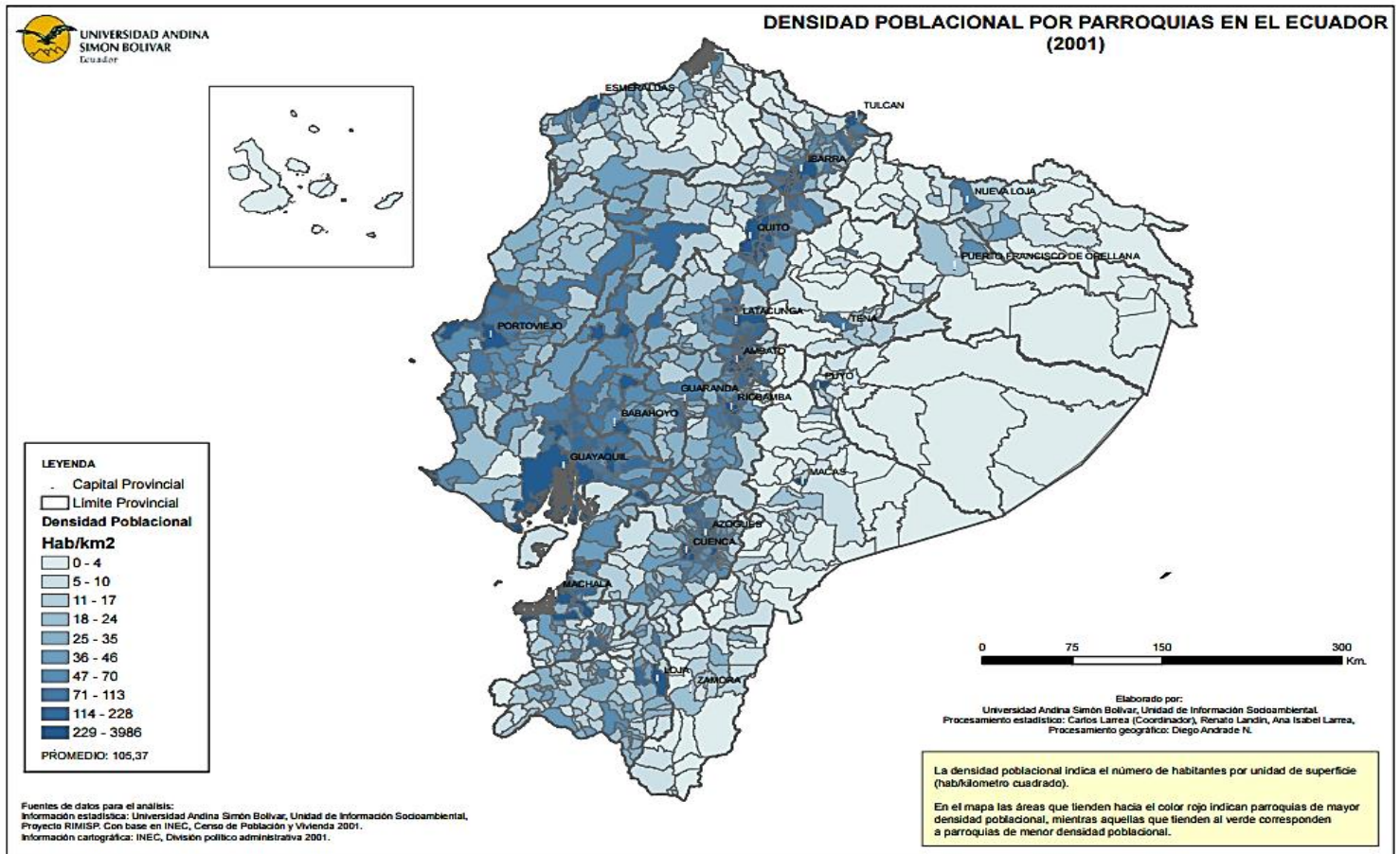


Ilustración 3.3 Densidad poblacional (hab/km²) en el Ecuador.
Fuente: Información estadística, Universidad Andina Simón Bolívar, Unidad de Información Socio ambiental.

Según datos presentados por el INEC sobre el censo de población y vivienda, se tiene el siguiente comportamiento poblacional en el país:

- En el censo entre los años 1990 y 2001, el Ecuador experimentó un crecimiento demográfico de 2,6 millones de habitantes, pasando su población de 9,6 millones a 12,2 millones de habitantes.
- Entre los censos de 2001 y 2010, el país incremento otros 2,3 millones llegando a los 14,5 millones de habitantes. Según estos datos se estima que para el siguiente censo en el año 2020 la población ecuatoriana tendría de 17,0 a 17,5 millones de habitantes como se pauta en el gráfico 3.3.

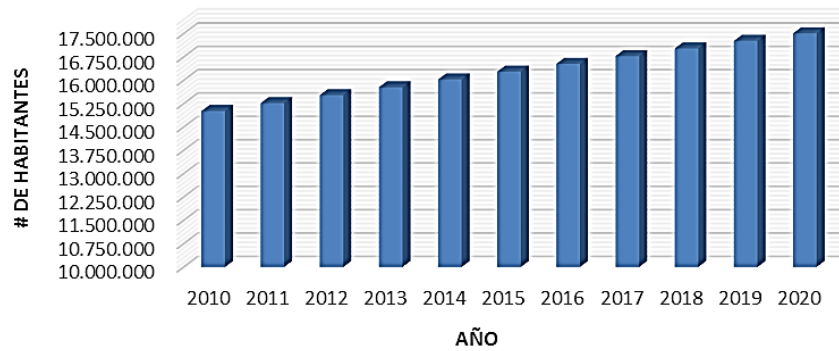


Ilustración 3.4 Proyección de la Población Ecuatoriana (INEC).
Fuente: Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC) [19]

Por lo tanto, tomando en cuenta que la población va en aumento y con ello una mayor demanda de los servicios eléctricos, electrónicos de comunicación, etc., se vuelve indispensable mejorar la protección de los diferentes sistemas para de ese modo incrementar la calidad y tener una mejor eficiencia de los servicios, lo que conlleva a la satisfacción de los usuarios.

3.4. Clima

Debido a la presencia de la cordillera de los Andes y por la influencia del mar (Corriente del Niño, la corriente de Humboldt) [20], el Ecuador es climatológicamente variado. El país cuenta dos estaciones definidas: la húmeda y la seca, conocidas como invierno y verano, respectivamente.

Generalmente, “*en el invierno las lluvias se presentan en el mes de Diciembre y se prolongan hasta el de mayo, por consiguiente el verano se da en los seis meses restantes*”¹⁶. A continuación se detallan características generales presentadas en cada región del país:

- **Amazonia:** Por lo general tiene un clima cálido, húmedo y lluvioso constante todo el año. La temperatura promedio varía entre los 23 y los 26 °C. Corresponde a los territorios ubicados por debajo de los 1300 msnm¹⁷ en las derivaciones orientales

¹⁶ Instituto Oceanográfico de la Armada. /DERROTERO DE LA COSTA CONTINENTAL E INSULAR DEL ECUADOR /Guayaquil /2005 /pág. 14

¹⁷msnm: metros sobre el nivel del mar.

de los Andes, incluyendo todas las cordilleras y tierras bajas hacia el Este, constituye la parte occidental de la cuenca amazónica [21].

- **Sierra:** En los Andes las temperaturas varían desde los 0 °C hasta los 24 °C en dependencia de la altitud la cual varía desde los 500 msnm hasta sobrepasar los 5000 msnm y la época del año. Presenta dos cadenas montañosas que corren paralelas de norte a sur y encierran concavidades intermedias, de aproximadamente 40 km de ancho, en las que se forman valles separados por cadenas transversales denominadas nudos.
- **Costa:** El clima es muy cálido con temperaturas que varían entre 25 y 31 °C durante todo el año. Es una región alargada, de entre 100 y 200 km de ancho, con una superficie relativamente plana. Se encuentra situada bajo los 1300 msnm. en las derivaciones occidentales de los Andes y El Océano Pacífico, incluyendo las cordilleras costeras y las tierras bajas.
- **Islas Galápagos:** El clima está definido por las corrientes oceánicas. Por lo general, de Junio a Diciembre, la fría Corriente de Humboldt llega del sur que genera una niebla húmeda y fría conocida garúa cerca del océano, lo cual crea un clima frío y seco. Por lo general cuenta con una temperatura promedio de 22 a 25°C y los meses lluviosos corresponden a Febrero, Marzo y Abril [21].

El clima de Ecuador es excepcionalmente difícil de predecir. Esto se debe a que su variedad topográfica es causa de igual variedad de microclimas que a su vez provocan que el tiempo varíe significativamente incluso en áreas vecinas pertenecientes a una misma región. Esto se debe al relieve y a la influencia de la corriente fría de Humboldt en verano, y de la cálida de El Niño en invierno.

- **EL NIÑO**

Durante su prevalencia, las corrientes oceánicas se calientan y elevan la temperatura del aire provocando precipitaciones. Este fenómeno también desestabiliza los ecosistemas y las cadenas alimenticias de las Islas, causando catastróficas hambrunas en muchas

especies, mayormente debido a la falta de nutrientes que llegan con las corrientes frías provocando dramáticas inundaciones en Ecuador y en la costa de Sudamérica como se observa en la ilustración 3.5.



Ilustración 3.5 Fenómeno Climático El Niño.

Fuente: Medios de comunicación: Ecuavisa, El Mercurio. [22] [23]

Según el INAMHI¹⁸ las brisas marinas que nacen del océano Pacífico y nubosidades provenientes del Brasil han provocado las variaciones climáticas presentes en el país tales como: disminución de temperatura y lluvias intermitentes en la región Litoral, mientras que en la Amazonía se producen las tormentas eléctricas. Como ya se mencionó en el país se tienen dos estaciones climáticas (Invierno y Verano) a continuación se presenta un resumen de las mismas [24].

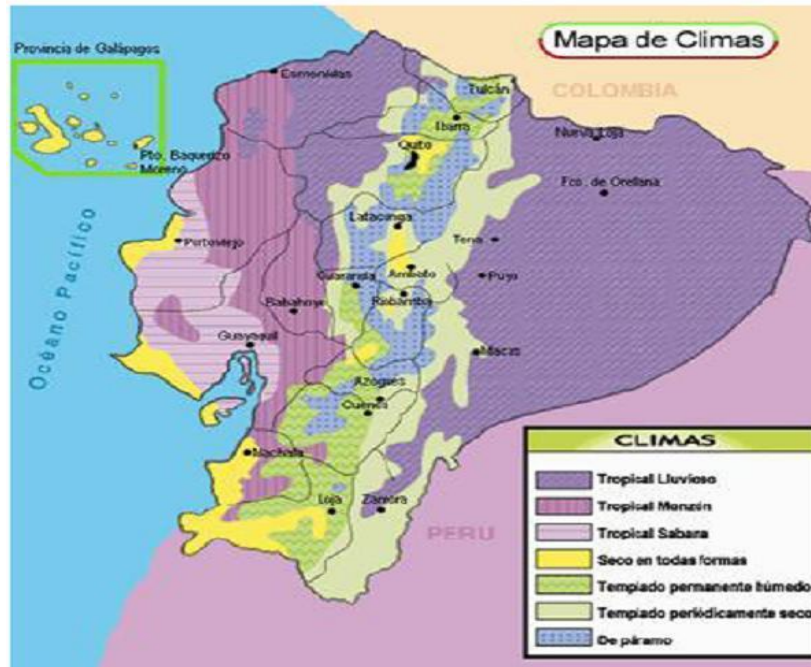
- El Invierno: Es una estación climática que se caracteriza por la lluvia.
 - Dura de 4 a 5 meses.
 - Va desde Enero hasta Abril o Mayo.
 - Tiene una temperatura Cálida y Húmeda.

- El Verano: Es una estación climática que se caracteriza por ser seca.
 - Dura de 7 a 8 meses
 - Va desde Mayo o Junio hasta Diciembre
 - Tiene una temperatura seca con un ambiente más fresco.

En la ilustración 3.6 se puede observar la variedad de climas presentes en el país, de lo que se concluye que en su mayoría la región Amazónica y parte de la provincia de

¹⁸ **INAMHI:** Instituto Nacional de Meteorología e Hidrografía.

Esmeraldas por tener un clima tropical húmedo y por ende mayor probabilidad para la ocurrencia de las descargas atmosféricas son los lugares más favorables para la colocación de los sensores.



*Ilustración 3.6 Mapa de Climas en el Ecuador.
 Fuente: esprovinciaverde.blogspot.com [25]*

3.4.1. Precipitación y temperatura

La precipitación si bien es cierto es un indicador indirecto de la probabilidad de la ocurrencia de los rayos, a continuación se presentan los niveles de precipitación en el Ecuador. En las gráficas 3.7 y 3.8 se dan a conocer la precipitación mensual y anual respectivamente, datos que son proporcionados por el INAMHI en donde se puede

observar los lugares más tendenciosos según este parámetro para las descargas atmosféricas.

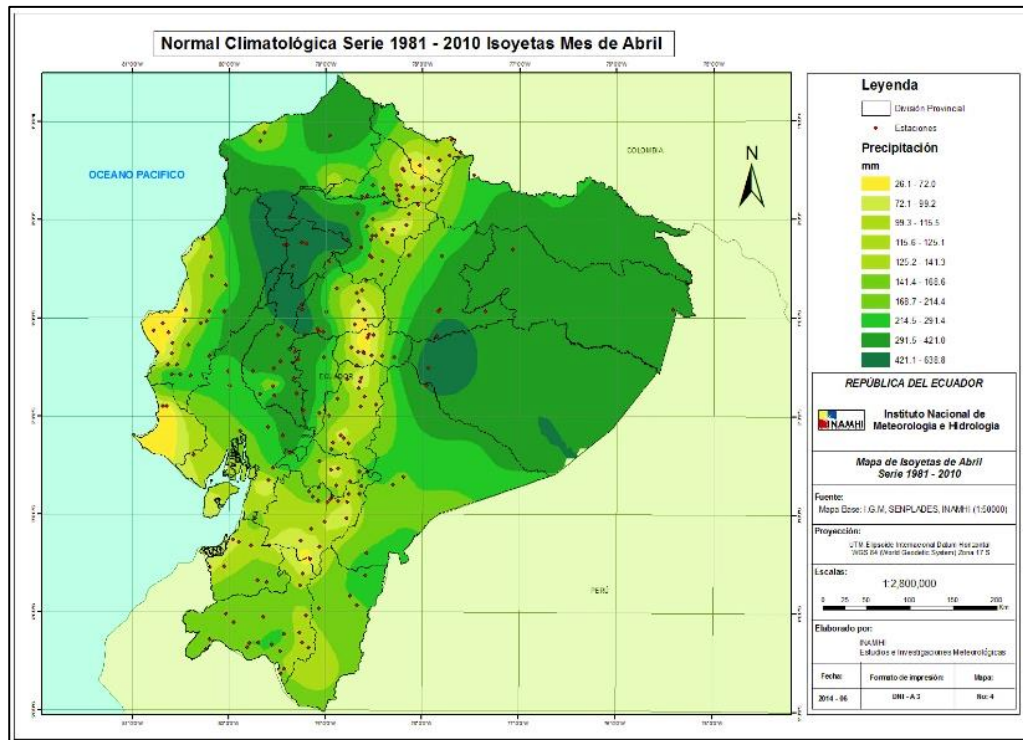


Ilustración 3.7 Mapa de Precipitación Mensual en el Ecuador.

Fuente: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. [26]

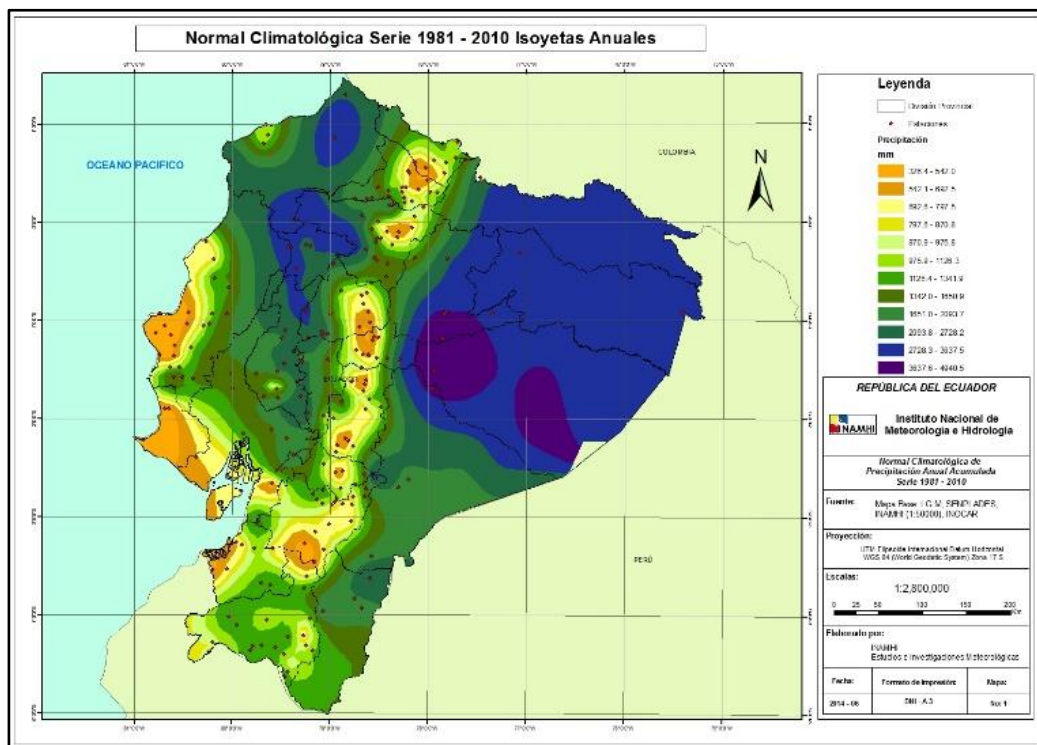


Ilustración 3.8 Mapa de Precipitación Anual en el Ecuador.

Fuente: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. [26]

De los mapas anteriores resulta que las zonas en donde se tiene una mayor precipitación según las escalas propuestas por el INAMHI como se puede observar en el gráfico 3.7 son la Amazonia en su gran mayoría, con el valor más alto de precipitación mensual en la provincia de Pastaza.

De igual forma en la gráfica 3.8 en cuanto a la precipitación anual se tiene una cifra elevada en la parte central y norte de la región Amazónica, además de una parte de la provincia de Esmeraldas al norte del país.

En la gráfica 3.9 se muestran las ciudades en el país en donde se tienen cifras elevadas de precipitación mensual, con lo que se tendría un mejor entendimiento y consecuentemente se puede determinar los lugares competentes para la colocación de los sensores.

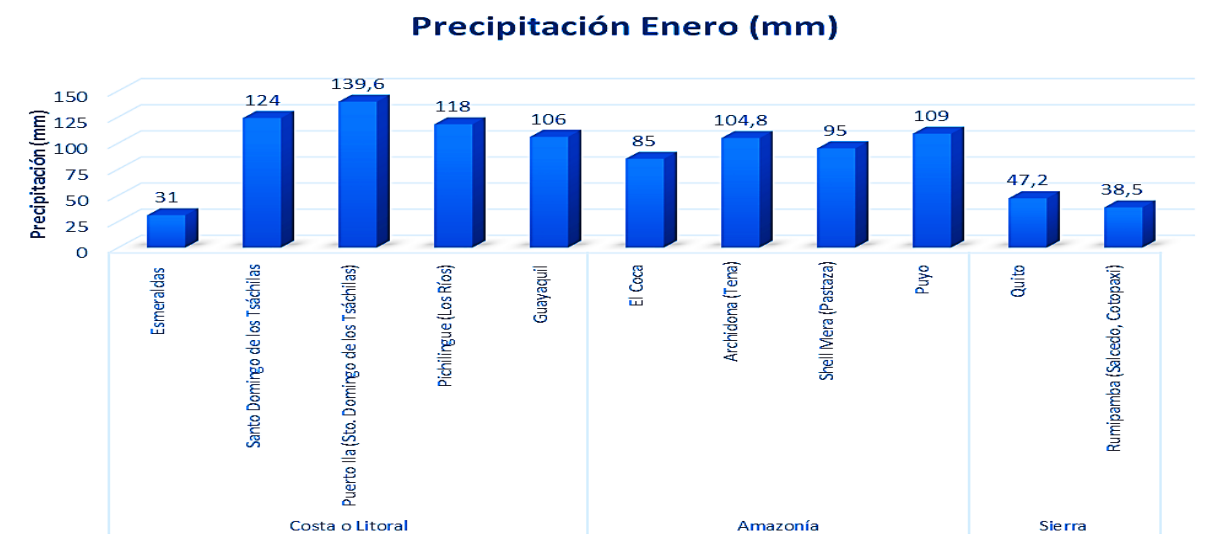
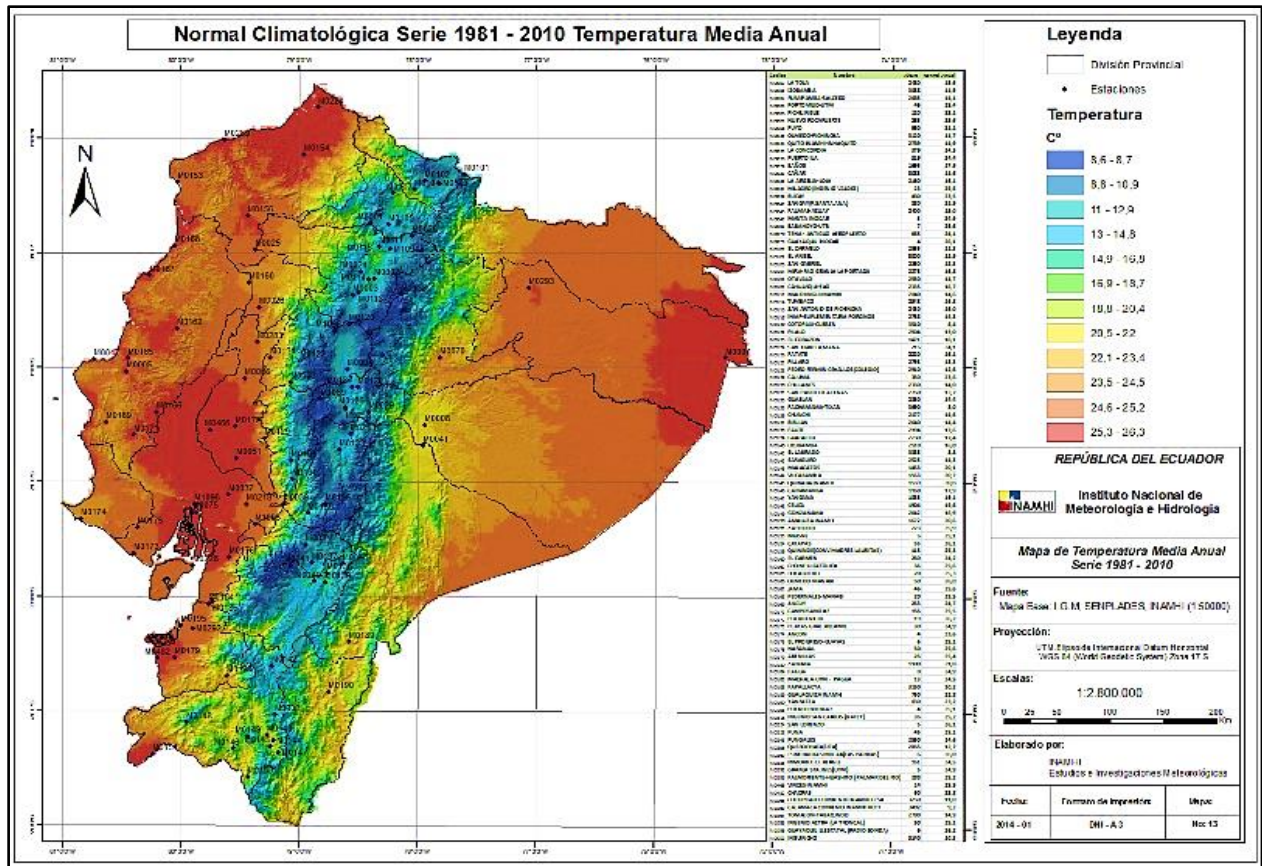


Ilustración 3.9 Máximo valor de precipitación presentado el mes de Enero en el país.

Como ya se mencionó son algunos parámetros que serán de ayuda para establecer los sitios idóneos para la colocación de los sensores y establecimiento de la red. Es por ello que a continuación se trata otro parámetro, la temperatura como se observa en la figura 3.10 de la cual claramente se puede deducir que tanto la Amazonía como la Costa tienen temperaturas cercanas de entre los 30°C a los 35°C.



*Ilustración 3.10 Mapa de la Temperatura en el Ecuador.
Fuente: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrografía. [26]*

Ahora bien, se conoce que la humedad indica la cantidad de vapor de agua que se encuentra presente en el aire pues depende de la temperatura ya que el aire caliente contiene más humedad que el aire frío y por consiguiente son lugares más propensos a formar nubes de tormenta.

3.5. Indicadores de ocurrencia de los rayos

Existen actualmente algunos indicadores (directos o indirectos) además de parámetros que muestran las zonas de Ecuador donde son registrados o potencialmente registrados mayores índices de ocurrencia de rayos, entre ellos están los siguientes.

- Datos de Lightning Imaging Sensor (LIS).
- Nivel Cerámico.
- Número de muertes a causa de los rayos.

A continuación se van a puntualizar cada uno, con el propósito de establecer los sitios oportunos en el país para la colocación de los sensores a fin de tener la mayor cobertura territorial y por ende tener una mayor eficiencia para los usuarios.

3.5.1. Base de datos del satélite LIS (Lightning Imaging Sensor)

En la figura 3.11 se presenta un mapa en donde se muestra la información del sensor LIS que posee la NASA, en donde mediante una escala de colores se indica el número promedio anual de descargas por km². Se puede observar que para el caso de Ecuador se tiene un promedio que está en un intervalo de entre 1 a 20 descargas anuales por km².

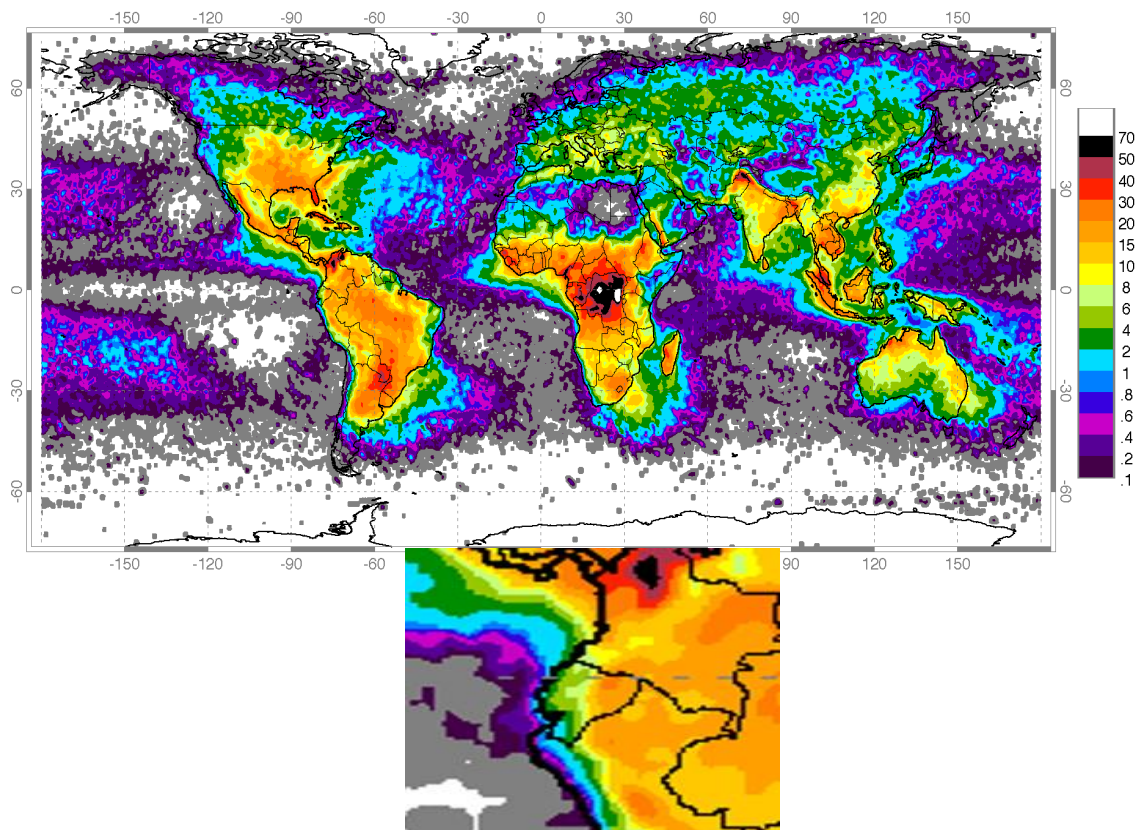


Ilustración 3.11 Descargas anuales por km² según el satélite LIS, periodo Abril 1995 –Febrero 2003.
Fuente: National Weather Service. [11]

Según la escala de colores se puede concluir que en la región amazónica es en donde hay una mayor presencia de descargas, presentándose para esta zona entre 10 a 20 descargas anuales por km².

3.5.2. Nivel Cerámico en el Ecuador

El nivel cerámico se puede definir como es el número promedio de días al año en los que se presenta una tormenta, es decir se escucha un trueno y cae al menos un rayo. Se suelen expresar por medio de mapas con curvas de nivel isocerámico como se muestra en la gráfica 3.12.

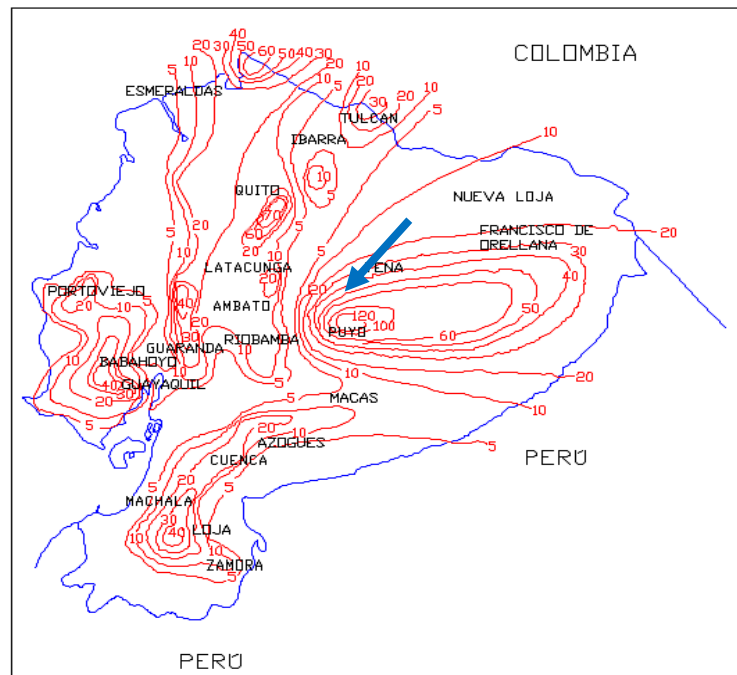


Ilustración 3.12 Nivel Cerámico en Ecuador.
Fuente: Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC).

Ahora bien, según los datos de la figura 3.11 para el Ecuador la densidad de descargas a tierra son aproximadamente de 20 tormentas con descargas al año. Sin embargo, mediante la gráfica 3.12 se puede tener una idea más clara de los lugares específicos en donde se tiene un mayor número de descargas, teniendo un mayor nivel cerámico en la provincia de Pastaza específicamente en la ciudad de Puyo, con una cantidad alrededor de 100 a 120 días al año en los que se presenta una tormenta. Seguido de las provincias: Pichincha, Esmeraldas, Guayas y Loja que de igual forma presentan un nivel cerámico significativo en el país.

3.5.3. Zonas de ocurrencia de rayos - número de muertes a causa de los rayos.

Por otra parte, se tomó como referencia el número de muertes originadas por los rayos lo cual sirve de ayuda para la distribución de los sensores. Para ello se averiguó en publicaciones web la cifra de muertes en Latinoamérica, en donde el país que encabeza esta lista es Brasil con 130 personas/año, toda esa información se da a conocer en la figura 3.13.

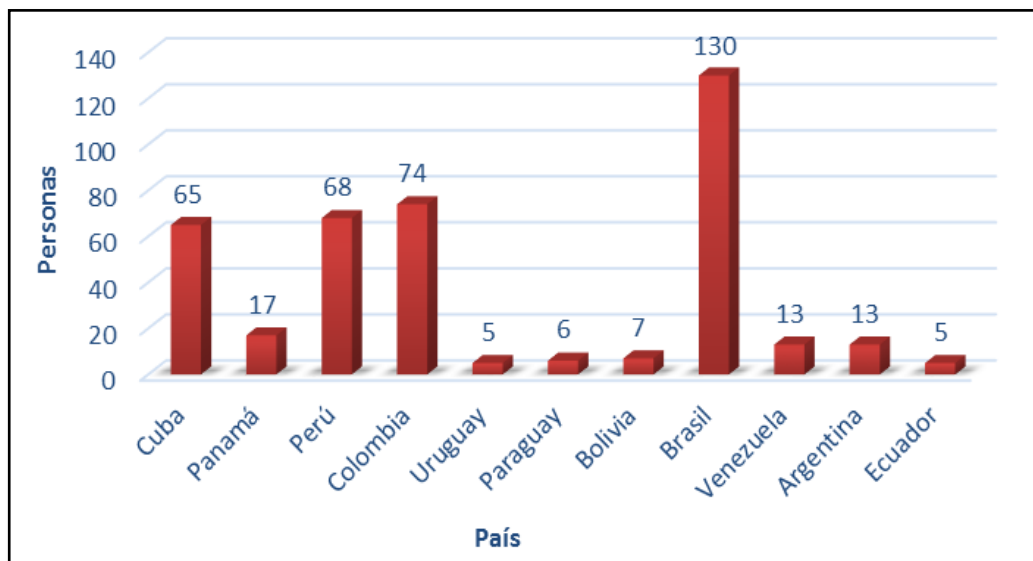


Ilustración 3.13 Número de muertes a causa de los rayos en Latinoamérica.
Fuente: Grupo de Electricidad Atmosférica (ELAT / INPE) Brasil, 2014.

Luego se buscó información procedente de medios de comunicación locales para conocer los lugares en donde se tiene una mayor ocurrencia de descargas en el país, la información se presenta en la figura 3.14.

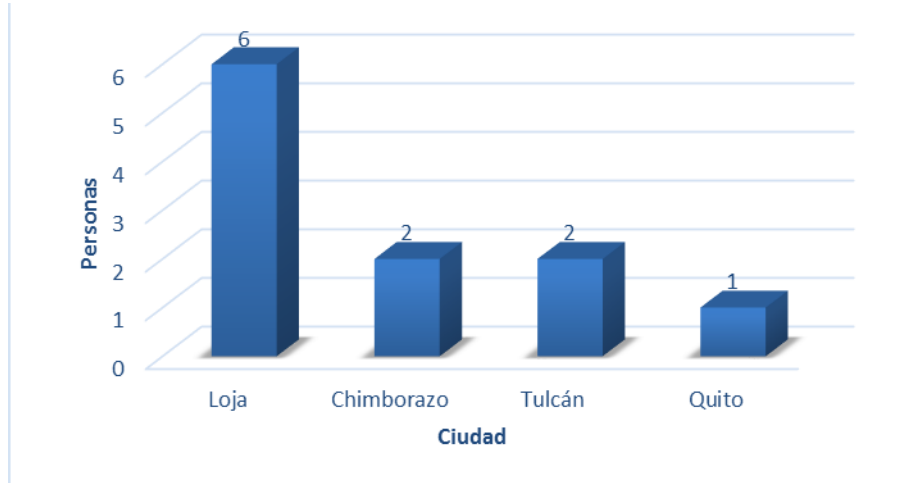


Ilustración 3.14 Número de muertes a causa de los rayos en Ecuador (2014-2016).
Fuente: Publicaciones en Diarios Nacionales [23].

Finalmente, a partir del análisis de los diferentes parámetros descritos anteriormente para ubicar los lugares idóneos para la colocación de los sensores, se debe considerar que lo que se pretende es equilibrar gastos para no colocar los sensores en donde no exista actividad humana. Por consiguiente, de la figura 3.4 en donde se muestra la densidad poblacional en el Ecuador se puede concluir si el lugar establecido es el correcto, dado que en la región Amazónica existen zonas de muy baja densidad poblacional.

4. ESTUDIO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED DE DETECCIÓN DE RAYOS EN ECUADOR

4.1. Generalidades

En este capítulo se abordarán algunos aspectos técnicos teniendo como objetivo el planteamiento de una red de detección de descargas atmosféricas en el país, para ello se toma como referencia los indicadores para la ocurrencia de rayos en Ecuador así como la demografía e zonas sensibles a proteger, con el fin de identificar los lugares adecuados para la colocación de los sensores y así detectar de manera eficiente el campo electrostático generado por una nube de tormenta. Para ello se va utilizar información técnica de sensores existentes en el mercado para determinar los más idóneos al momento de estructurar la red. Finalmente se presenta dos propuestas de red (caso óptimo, menor costo) para luego hacer un análisis técnico-económico y presentar la mejor opción.

4.2. Zonas para la ubicación de los sensores

Con los datos del capítulo anterior se puede concluir que los lugares idóneos para la colocación de los sensores de detección de rayos son en su mayoría la región amazónica debido a su clima y a todos los factores que presenta el lugar y que hacen favorable la formación de tormentas eléctricas. Sin embargo hay otros parámetros que se deben tomar en consideración tales como la densidad poblacional figura 3.4, actividades desarrolladas en la zona (petroleras, mineras, aeropuertos, etc.) para eso tiene como guía las figuras (**Anexo 1, 2, 3**) con el fin de equilibrar gastos y ubicar los sensores en lugares idóneos tales como las grandes ciudades, con lo que se garantizaría la protección ciudadana y del medio ambiente.

Tomando en cuenta esos parámetros los lugares adecuados serían los siguientes:

- En la Amazonía: Sucumbíos, Pastaza (Campos petroleros, Hidroeléctricas).
- En la Sierra: Grandes ciudades (Quito, Cuenca, Loja).
- En la Costa: Manabí, Esmeraldas y Guayas.

En la figura 4.1 se indican los lugares en donde irían ubicados los sensores:



Ilustración 4.1 Ubicación de los sensores en Ecuador.

Fuente: Elaboración propia.

La investigación pretende, que partiendo de la identificación de las zonas favorables (provincias) para la ocurrencia de las descargas atmosféricas se den a conocer los lugares que se tomarían como referencia para la colocación de los sensores en cada una de las zonas. En este caso lo que se quiere es que cada sensor abarque zonas tales como: aeropuertos, industrias, demográficas, viales (**Anexo 4**), reservas ecológicas (**Anexo 5**), áreas deportivas, hidroeléctricas, petroleras, etc. Con lo que se tendría una mayor cobertura territorial y se garantizaría a los usuarios finales una mejor eficiencia y calidad del servicio, ya que permitirían tomar medidas preventivas en tiempo real para la reducción del riesgo por los efectos del rayo.

Ahora bien, para tener una mejor referencia de esos lugares a continuación se muestran mapas del lugar en donde se ubicarían cada uno de los sensores en cada provincia, los cuales se encuentran identificados de color azul mientras que con el color amarillo se muestran algunos de los lugares que se encontrarían dentro del radio de cobertura del mismo.

4.2.1. Región Costa

En esta región los sensores estarían ubicados en las provincias de Guayas y Manabí pues son los lugares en donde se tiene mayor densidad poblacional además de ser zonas que por su localización hay mucha afluencia de turistas por sus playas.

En la provincia de Manabí el sensor estaría localizado en el Hotel Oro Verde en la marcación con color azul como se muestra en la figura 4.2 y para el caso de la provincia del Guayas el sensor se ubicaría en el centro de la ciudad de Guayaquil específicamente en el Hotel Hilton Colon como se observa en la figura 4.3 , lo que se pretende es tener una mayor cobertura en áreas tales como: los aeropuertos (internacionales o nacionales), espacios abiertos (estadios, parques, áreas protegidas), las diferentes playas, sector industrial, las vías principales y la Fuerza Aérea Ecuatoriana para el caso de la provincia del Guayas.

Provincia de Manabí:

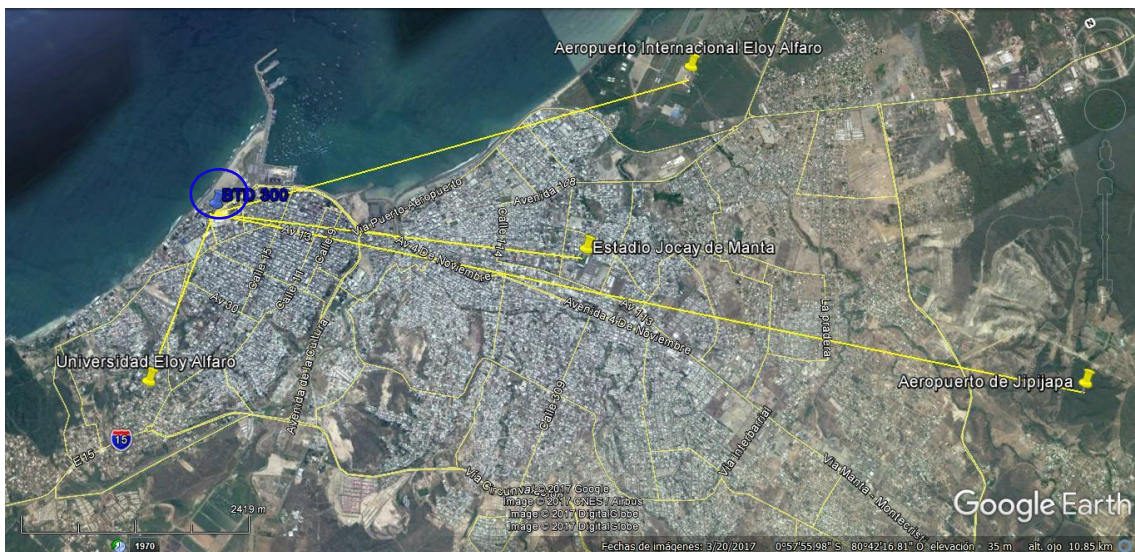
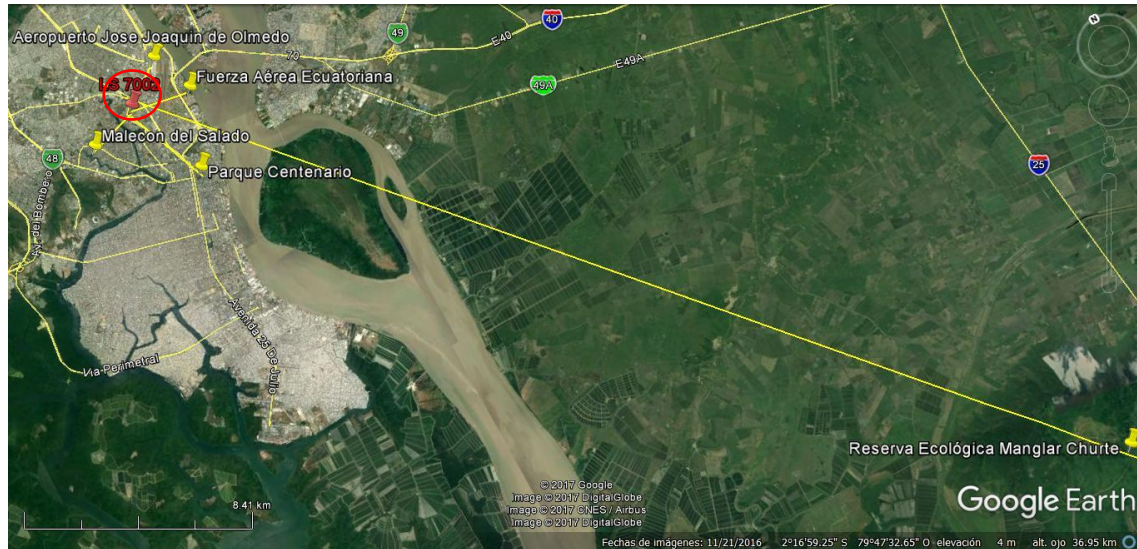


Ilustración 4.2 Ubicación del Sensor en la provincia de Manabí.

Fuente: Elaboración Propia.

Provincia del Guayas:



*Ilustración 4.3 Ubicación del Sensor en la provincia de Guayas.
Fuente: Elaboración Propia.*

4.2.2. Región Sierra

De modo similar que en la región costanera el objetivo es cubrir en su mayoría lugares en donde exista una mayor concentración de personas considerando los factores presentados en el literal 3.5 del capítulo anterior, teniendo en cuenta que en toda esta región se tiene una gran concurrencia de centrales de generación de electricidad, áreas protegidas y sobre todo lugares de mucha demanda turística, quienes formarían parte de los usuarios finales y a quienes les llegaría la información para actuar de manera preventiva en el caso de ocurrir una descarga atmosférica.

Por lo tanto, en la provincia de Pichincha se muestra la gráfica 4.4, el sensor estaría ubicado en la ciudad de Quito la cual es considerada como una de las ciudades más grandes del país. El lugar de ubicación es el Hotel Quito, el cual se encuentra localizado en el centro de la ciudad con lo que se consigue tener una mejor cobertura cumpliendo con todas las expectativas planteadas anteriormente.

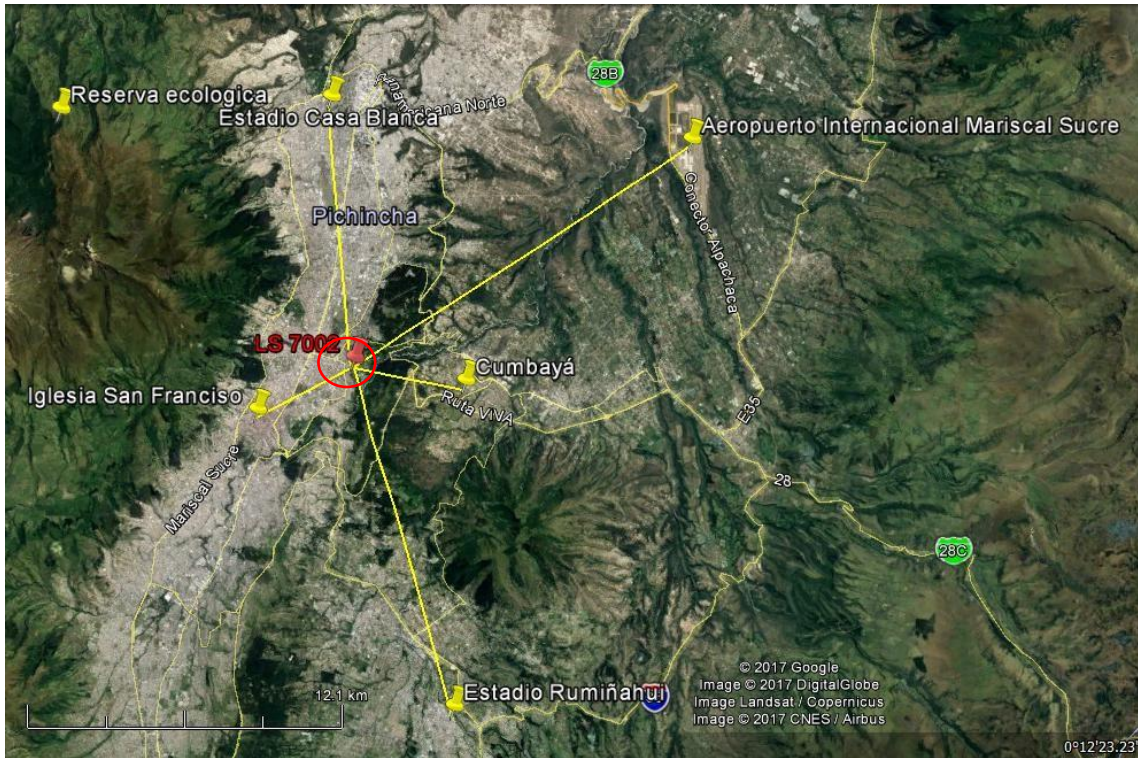
Del mismo modo, para la provincia de Cotopaxi el sensor se localizaría en el Hotel Villa de Tacvnga ubicado al sureste en el centro histórico de la ciudad de Latacunga como se ve en la figura 4.5, el cual es un lugar estratégico puesto que desde ahí se cubriría lugares como parques nacionales, lugares turísticos como Baños de Agua Santa, sin olvidarse de que es una de las provincias en donde se presentan muertes a causa de las descargas atmosféricas.

A continuación se consideró la provincia del Azuay por ser la tercera ciudad más poblada según el INEC, el sensor estaría ubicado en la ciudad de Cuenca específicamente en la Universidad de Cuenca pues al encontrarse cercana al centro de la ciudad es un lugar desde donde como se tiene acceso al aeropuerto, parque industrial, centrales hidroeléctricas y Térmica (Mazar Dudas, Minas San Francisco, El Descanso), lugares turísticos (Mirador de Turi), entre otros.

En este caso se tienen dos gráficas para tener una mejor visión de la ubicación del sensor en la ilustración 4.6 se observa los lugares céntricos de la ciudad que requieren ser cubiertos por el sensor, mientras que en la ilustración 4.7 se muestran sitios alejados por decirlo de cierto modo pero que entrarían dentro del radio de cobertura del sensor.

Finalmente, en la gráfica 4.8 se indica la ubicación del sensor al sur de esta región localizado específicamente en la provincia de Loja concretamente en el Hotel Howard Johnson desde el cual se tiene acceso a diferentes zonas tales como: Central Eólica Villonaco, Centrales Hidroeléctricas (Sopladora, Delsitanisaguha), áreas protegidas (Parque Nacional Podocarpus, Parque Nacional Yacurí), aeropuerto, lugares turísticos (Virgen del Cisne, museos), estadio, etc.

Provincia de Pichincha:



*Ilustración 4.4 Ubicación del Sensor provincia de Pichincha.
Fuente: Elaboración Propia.*

Provincia de Cotopaxi:



*Ilustración 4.5 Ubicación del Sensor provincia de Cotopaxi.
Fuente: Elaboración Propia.*

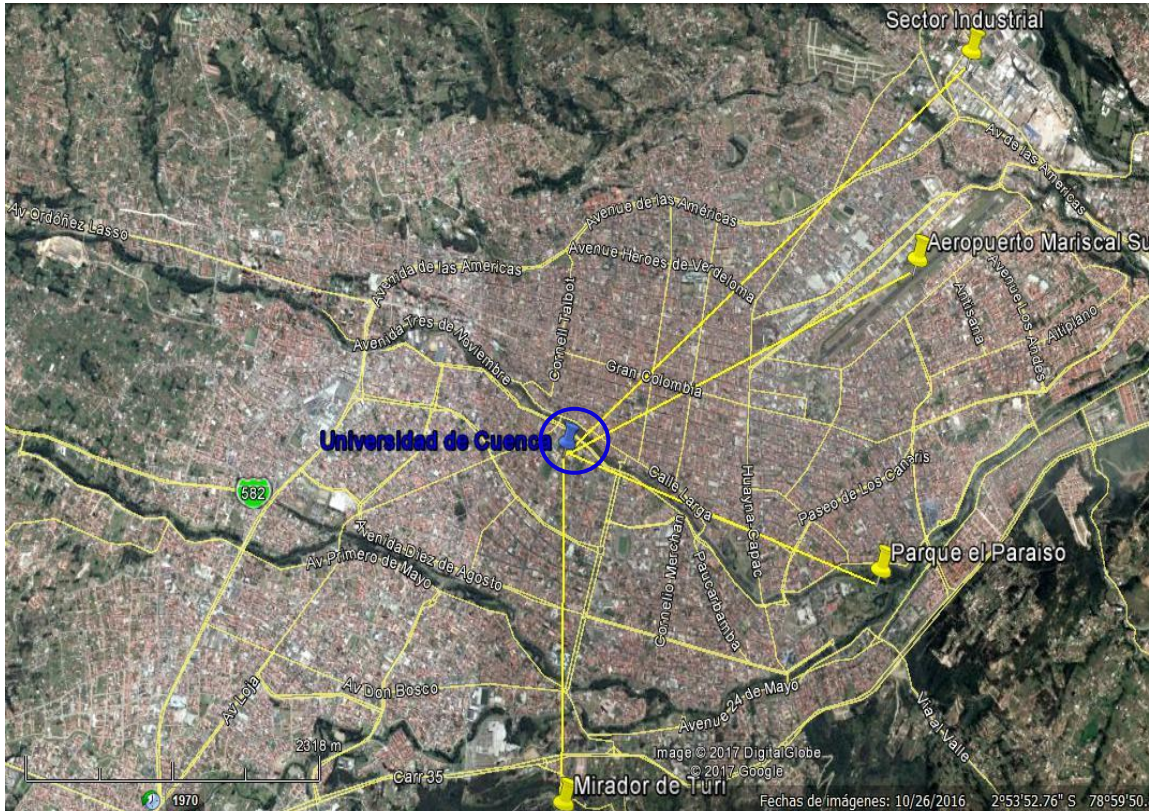
Provincia de Azuay:


Ilustración 4.6 Ubicación del Sensor provincia del Azuay, centro de la ciudad de Cuenca.

Fuente: Elaboración Propia.

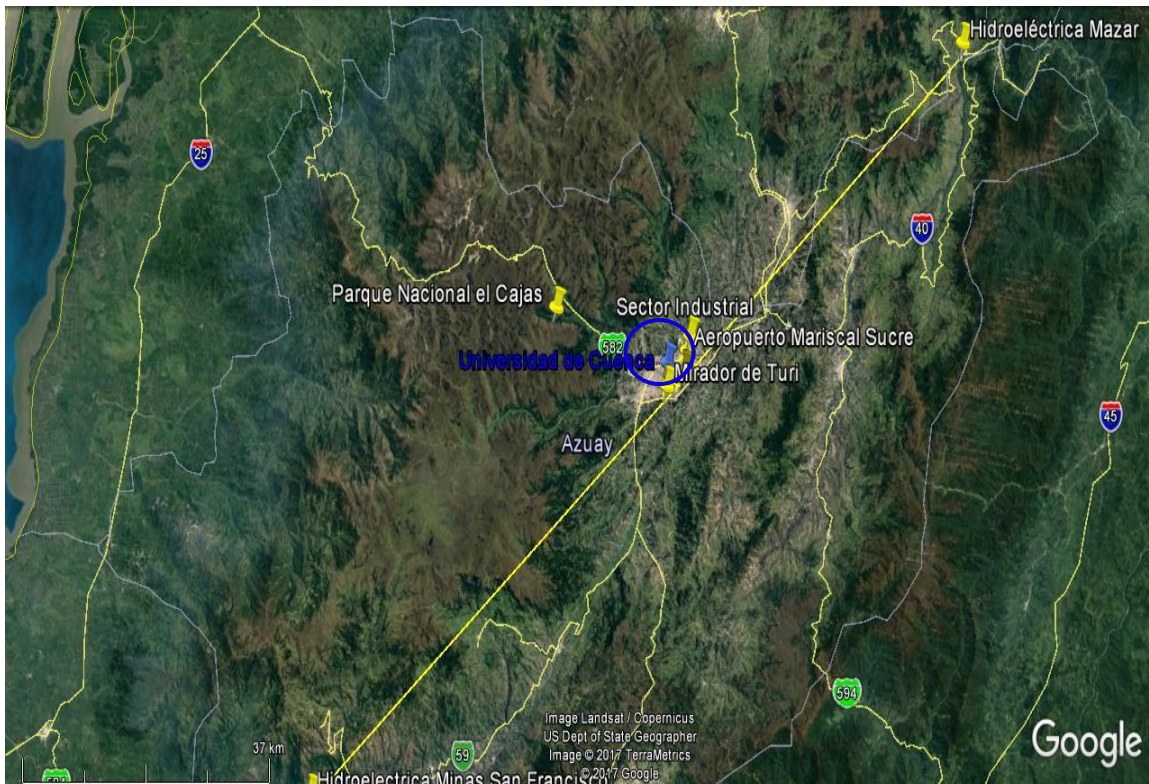
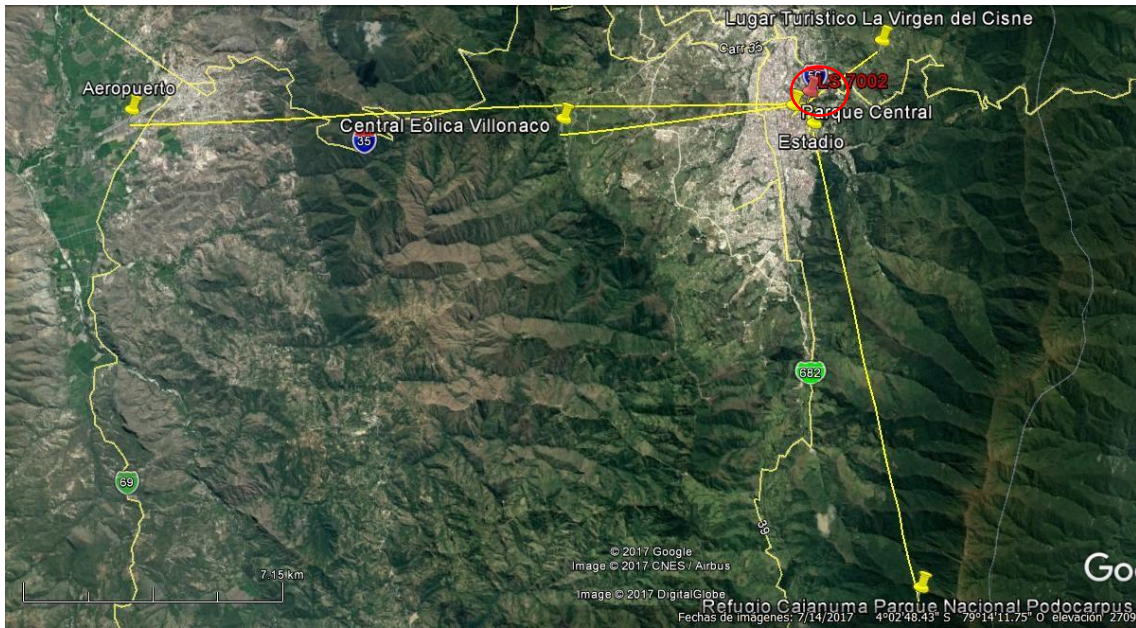


Ilustración 4.7 Ubicación del Sensor provincia del Azuay.

Fuente: Elaboración Propia.

Provincia de Loja:



*Ilustración 4.8 Ubicación del Sensor provincia del Azuay.
Fuente: Elaboración Propia.*

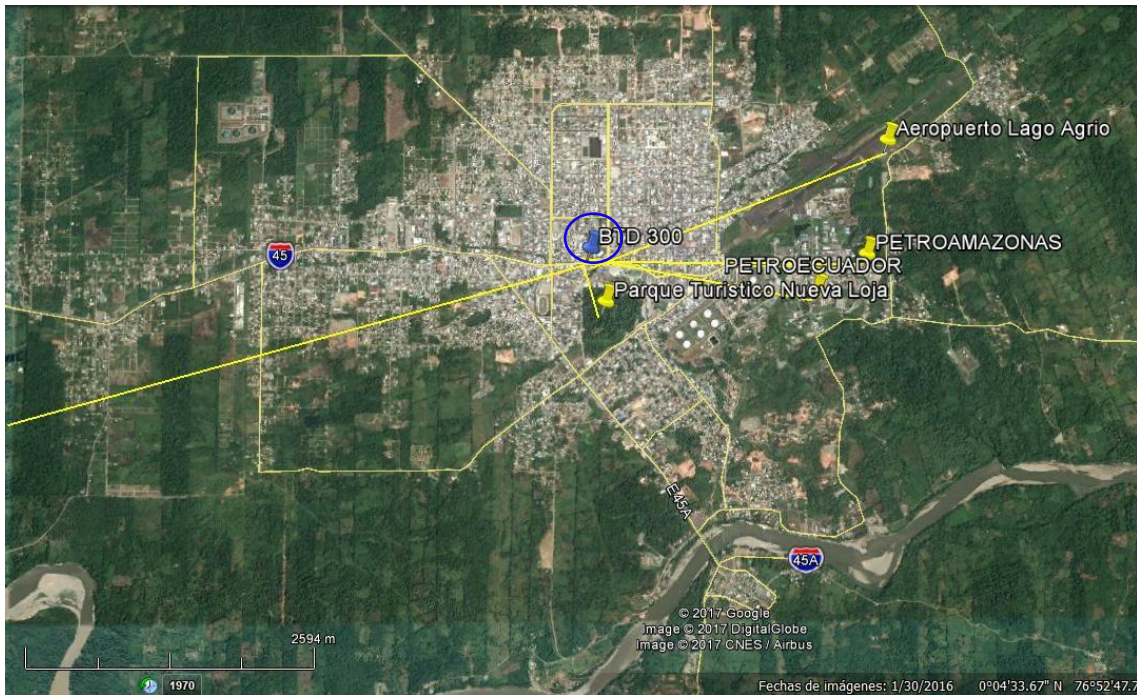
4.2.3. Región Amazónica

Por último, en esta región se sitúan dos sensores en las provincias de Sucumbíos y Pastaza, es decir en las ciudades de Nueva Loja y Puyo respectivamente como se muestran en las gráficas 4.9 y 4.10, el objetivo de estos sensores es cubrir:

- Las zonas petroleras,
- Parques nacionales,
- Hidroeléctricas como es el caso de la Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair siendo la más grande central de generación eléctrica en el país.

Tomando en cuenta los sitios que hay que cubrir los sensores tiene la siguiente ubicación, en la ciudad de Nueva Loja el sensor está situado en el Gran Hotel Lago Agrio mientras que en la ciudad del Puyo el sensor se encuentra localizado en el Hotel Puyo Jardín Relax.

Provincia de Sucumbíos:



*Ilustración 4.9 Ubicación del Sensor provincia de Sucumbíos.
Fuente: Elaboración Propia.*

Provincia de Pastaza:



*Ilustración 4.10 Ubicación del Sensor provincia de Pastaza.
Fuente: Elaboración Propia.*

En resumen, el Ecuador contaría con ocho sensores ubicados de manera distribuida los cuales por asuntos de estética para no afectar el paisaje urbano y por el hecho de que no se encuentre en zonas donde se tenga distorsiones de campo eléctrico, se optó por lugares desde los cuales se obtenga una mayor cobertura y haya un mejor acceso a las zonas que conformarían los usuarios finales cumpliendo a cabalidad con los aspectos y parámetros, considerando los diferentes factores ya sean estos directos o indirectos los cuales influyen en el desarrollo de las descargas atmosféricas, en la gráfica 4.11 se muestra la ubicación de los sensores en el país.



*Ilustración 4.11 Ubicación de los sensores en Ecuador.
 Fuente: Elaboración Propia.*

4.3. Redes de detección y localización de rayos a nivel mundial

A nivel mundial existen diversos sistemas de localización operando en forma individual o en conjunto con otros sistemas, formando grandes redes de localización de

rayos con el propósito fundamental de reportar la actividad atmosférica. Algunas de estas redes son las que se mencionan a continuación:

- **NATIONAL LIGHTNING DETECTION NETWORK (NLDN)**

La Red Nacional de Detección de Rayos (NLDN), está formada por más de 100 estaciones de detección situadas en Estados Unidos que detectan instantáneamente las señales electromagnéticas emitidas cuando el rayo golpea la superficie de la Tierra. Los sensores envían los datos a través de una red de comunicaciones satelital al Centro de Control de Red. Luego los analizadores centrales de la Red Nacional de Detección de Rayos procesan la información sobre la ubicación, el tiempo, la polaridad y la comunicación a los usuarios finales [27].

En la figura 4.12 se puede observar la distribución y tipo de sensores instalados sobre el territorio norteamericano.

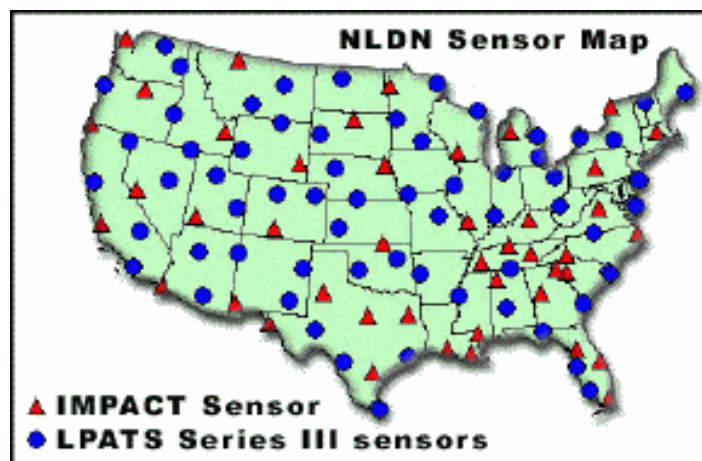


Ilustración 4.12 Distribución de los sensores que conforman la red NLDN en Estados Unidos.

Fuente: National Aeronautics and Space Administration [28]

- **EUROPEAN COOPERATION FOR LIGHTNING DETECTION (EUCLID)**

EUCLID tiene el objetivo de identificar y detectar rayos en Europa. En términos de eficiencia de detección y precisión de localización, actualmente la red consta de unos 147 sensores en 27 países contribuyendo a la detección de los rayos. La cobertura comprende desde el Golfo de Vizcaya hasta Varsovia y desde Sicilia al Norte de Noruega, como se observa en la gráfica 4.13.

Los usuarios reciben acceso en tiempo real a los datos de EUCLID. Las principales aplicaciones operacionales son: meteorología, hidrología, servicios de energía eléctrica, comunicaciones, seguros, silvicultura, defensa y aviación.

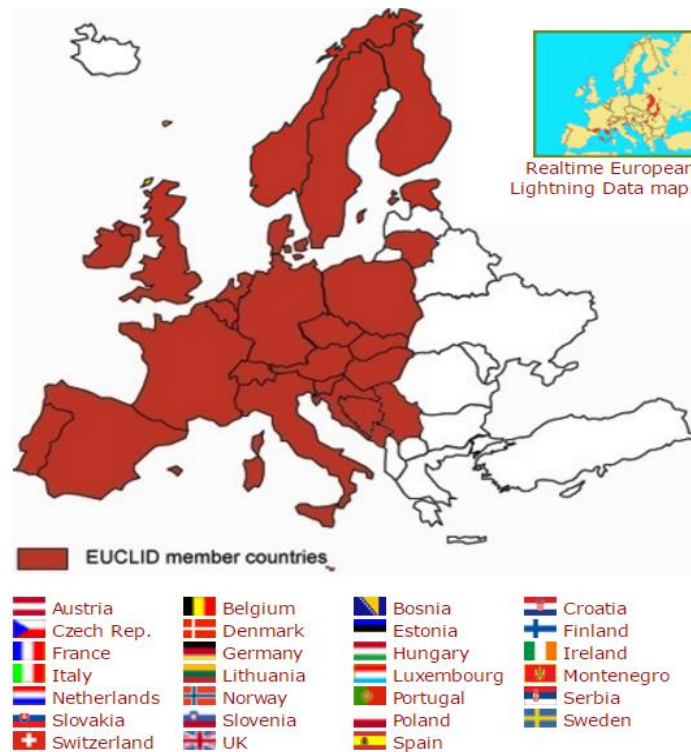


Ilustración 4.13 Cooperación de países europeos que conforman la red EUCLID.
Fuente: European Cooperation for Lightning Detection [29]

Todos los datos del rayo se detectan mediante sensores electromagnéticos, que envían datos a un analizador central. Cada sensor detecta la señal electromagnética emitida por la carrera de retorno de la luz. Esta tecnología utiliza señales de satélite GPS para obtener información sobre el tiempo.

Para cada rayo se registran los parámetros principales, es decir, la hora del evento, el punto de impacto (latitud y longitud), intensidad y polaridad de la corriente y el número de golpes posteriores. EUCLID emplea dos centros de procesamiento de la información reportada por la red, calculando la ubicación de los rayos y generando una imagen en tiempo real de la actividad eléctrica atmosférica [29].

- **WORLD WIDE LIGHTNING LOCATION NETWORK (WWLLN)**

La red WWLLN, dirigida y creada en la Universidad de Washington en Seattle, cuenta con más de 50 estaciones de medición en colaboración con universidades e institutos que albergan sus estaciones de medición alrededor del mundo. Los sensores que conforman la red pueden detectar, localizar y generar mapas de la actividad atmosférica. El funcionamiento de los sensores trabaja en niveles de frecuencia VLF (3-30 kHz) [1]. La información reportada por el sistema WWLLN puede ser visualizada como se muestra en la gráfica 4.14:

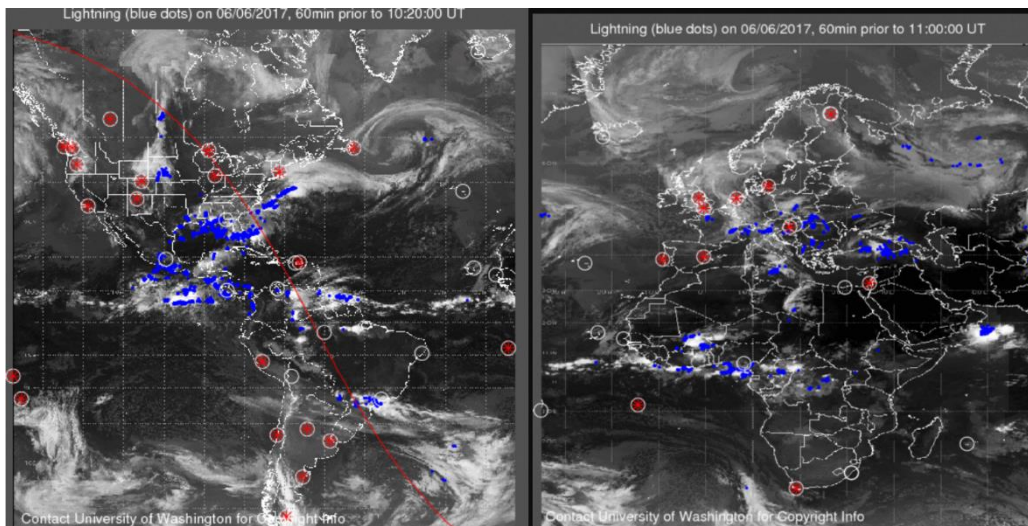


Ilustración 4.14 Mapas de actividad atmosférica reportados por la red WWLLN.
Fuente: World Wide Lightning Location Network [1]

- **RED LINET**

La tecnología LINET desarrollada en la Universidad de Múnich, en Alemania, tienen la capacidad de detectar ambos tipos de rayos Nube – Tierra e Intranube, trabajando en VLF/LF, debido a la técnica de detección TOA. Estas características le permiten proveer no solo información de la posición horizontal (latitud, longitud) sino también de la posición vertical del rayo detectado.

En Colombia la red de localización y detección de rayos LINET entró en operación en septiembre de 2011. Actualmente esta red se compone de 10 sensores instalados como se muestra en la figura 4.15. Esta red cubre aproximadamente el 80% del territorio

colombiano, teniendo una eficiencia superior al 95% sobre el interior del país. Durante los dos primeros años de operación, la red detectó más de 30 millones de descargas a septiembre de 2013 [30].

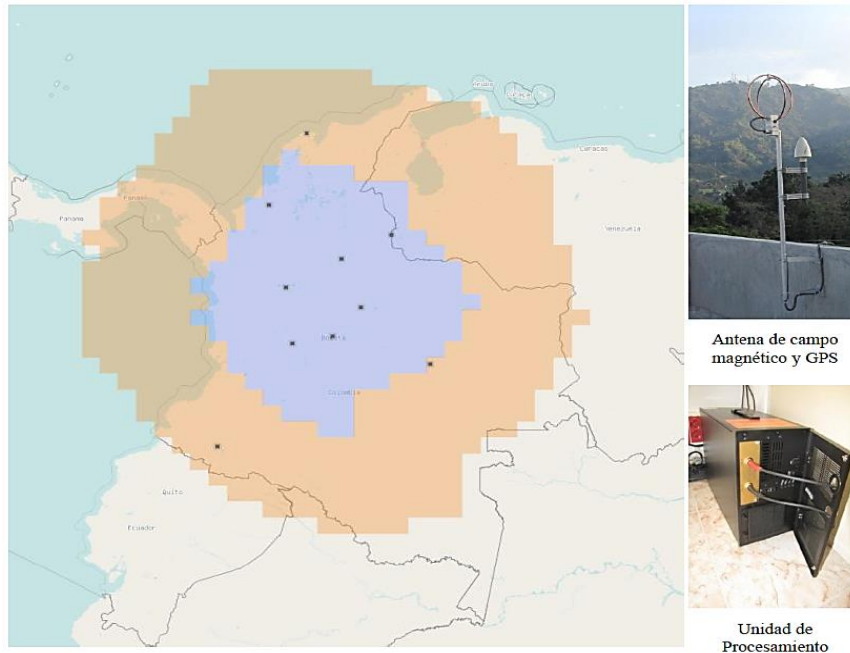


Ilustración 4.15 Cobertura de la Red LINET en Colombia.

Fuente: Integración de los Sistemas de Alerta de Tormentas Eléctricas en Redes Inteligentes [30]

4.4. Clasificación de los dispositivos de detección

Los dispositivos detectores de tormentas eléctricas se clasifican en función de la fase de tormenta que pueden identificar según la norma internacional IEC 62793: Protección contra el rayo: Sistemas de aviso de tormentas. Se distinguen cuatro fases en la evolución de una tormenta eléctrica y se clasifican los detectores en función de las fases de la tormenta y de los tipos de descargas que pueden medir. Sin embargo, un sensor puede distinguir uno o varias etapas [31].

El ciclo de vida de la tormenta como se describió en la sección 1.4.1 se divide en cuatro fases:

1. Fase inicial
2. Fase de crecimiento

3. Fase de maduración

4. Fase de disipación

Por lo tanto, los sensores de clase I son capaces de detectar todo el ciclo de vida de la tormenta (Fases 1 a 4).

Los sensores de clase II detectan las fases de crecimiento, maduración y disipación de la tormenta (fases 2 a 4), detectan las descargas IC y CG.

Los sensores clase III pueden localizar rayos a tierra (CG) con una limitada eficiencia, es decir son indicadores de las fases 3 a 4.

En la clase IV se relacionan los dispositivos que pueden detectar rayos CG (fase 3) y otras fuentes electromagnéticas con eficiencia muy limitada a este grupo pertenecen los dispositivos portátiles que emiten una señal audible y visual cuando detectan radiaciones electromagnéticas, pero no solo provenientes del rayo, de ahí su reducida eficiencia.

4.5. Sensores disponibles en el mercado

Una vez establecidos los lugares en donde serán colocado los sensores, se procede a indagar acerca de su disponibilidad en el mercado. En el transcurso de los últimos años los sistemas de monitoreo y detección de tormentas eléctricas han evolucionado a nivel mundial, estos dispositivos monitorean las variables que identifican los ciclos de vida de la tormenta, así como características propias de su desplazamiento, intensidad, entre otras.

En la tabla 1 se muestran sensores con sus aspectos más relevantes. De ahí que para el establecimiento de la red se debe considerar el sensor que presente las mejores características de todas las especificadas, con el fin de presentar un caso óptimo. Al mismo tiempo se planteará una segunda red con el objetivo de tener dos opciones estratégicas.

		DETECTORES CLASE I					DETECTORES CLASE II		
TIPO	EFM 550	ATSTORM v2	EFM 100	BTD - 300	LS 7001	LS 7002	TSS928		
CARACTERÍSTICAS	VAISALA(Campo eléctrico atmosférico)	at3w (sensor electrométrico de campo controlado)	BOLTEK (campo eléctrico)	Biral UK (campo eléctrico)	VAISALA (campo electromagnético)	VAISALA (campo electromagnético)	VAISALA (campo electromagnético)		
radio de cobertura	5km	20 km	38 km	83 km	350 km	350 km	0 - 56 km		
eficiencia rayos CG	x	x	x	95%	> 90%	95%	> 90%		
eficiencia rayos CC		x		x	10 - 30%	50%	x		
calibración	manual	automática	manual	automática	manual y automática	automático y manual			
peso	0,68 kg	9,10 kg	5,75 kg	25 kg	37,40 kg	37,40 kg			
altura	61 cm	350mm+ mástil 2m	17 cm	2,46 m	2,20 m	2,20 m	1,57 m		
ancho	22,90 cm	26 cm	13 cm	68 cm	40 cm	40cm	30,50 cm		
componentes	tiene partes mecánicas	electrónicos		sin piezas móviles	sin piezas móviles	sin piezas móviles			
funcionamiento	(-23 a +46 °C)	(-40 a 85 °C)	(-40 a 60 C / -40 a 140 F)	(-40 a 60 °C)	(-40 °C a +55 °C)	(-40 °C to +55 °C)	-50°C to +50°C (
consumo de energía	2,3W	15W	4 W	10 W			100W max		
mantenimiento	mantenimiento mínimo	no es necesario un mantenimiento continuo	mantenimiento mínimo	mantenimiento mínimo	mantenimiento mínimo	mantenimiento mínimo	mantenimiento mínimo		
Observaciones	Servicio de calibración de fábrica una vez / tres años	táctil (4niveles de alarma de acuerdo a las necesidades del cliente) se puede conectar a una red informática	4 Altos niveles de alarma de campo	Posee un módulo opcional que permite detectar a distancia y la dirección de la caída del rayo.	Compatible con sus predecesores, los sensores Vaisala IMPACT	min 4 para la red 15 a 350km entre los sensores recomendada	El formato de datos admite la interfaz directa con los sistemas de comunicación comunes y autodiagnóstico para comprobar el estado de la función del sensor.		

Tabla 1 Sensores Actualmente en el Mercado

4.6. Propuesta de Red

En el gráfico 4.16 se muestra de forma general los componentes que estructuran una Red de detección de rayos:



Ilustración 4.16 Componentes de una Red.

Fuente: Aplicación y Beneficios de Datos de Rayos en sector de Meteorología, de Aviación, Minero, Marítimo y Forestal, [32].

Por lo general, la manera de ubicar los rayos es utilizar un sistema de localización o LLS (lightning Location System) el cual trabaja con un mínimo de 4 a 5 sensores y un procesador central. Este sistema una vez que una descarga es detectada por los sensores se utiliza dos procesos ya sea el Time of Arrival (TOA) o el Magnetic Direction Finding (MDF). TOA para la localización de la descarga utiliza un mínimo de 3 sensores en donde cada par de sensores determinan una hipérbola y la intersección de esas hipérbolas serán las que de una referencia de donde ocurrió la descarga, mientras que el método MDF triangula los resultados de los sensores mediante un procesador central y un algoritmo determina el ángulo con un error mínimo ubicando el origen de la descarga [32].

Por lo tanto, para el establecimiento de la primera red se tienen los sensores: LS7002¹⁹ y BTD 300²⁰ de campo electromagnético y de campo eléctrico respectivamente, la segunda opción estaría compuesta por el sensor de campo eléctrico BTD 300.

En cuanto a la primera opción, el sensor LS 7002 trabaja con una base de datos específica es decir constaría de un software y un procesador de datos concreto para su funcionamiento, al cual se le conectaría los datos procedentes del sensor BTD 300, el costo de implementación de esta red es el presentado en la tabla 2. Para este caso los sensores de campo electromagnético por tener un mayor radio de cobertura estarían distribuidos en el país de tal forma que se cubra el mayor parte del territorio ecuatoriano, es decir estarían ubicados en las provincias (Pichincha, Guayas, Loja y Pastaza) mientras que los sensores de campo eléctrico estarían ubicados en las provincias (Azuay, Cotopaxi, Pastaza y Manabí) como se observa en la figura 4.17.



Ilustración 4.17 Ubicación de los sensores primera propuesta

¹⁹ Datasheet sensor de campo electromagnético LS 7002:

<http://es.vaisala.com/Vaisala%20Documents/Brochures%20and%20Datasheets/WEA-NWM-LS7002-Datasheet-B211284ES-A-LOW-v1v.pdf>

²⁰ Datasheet sensor de campo eléctrico BTD 300: <http://www.biral.com/wp-content/uploads/2015/08/BTD-DS-DOC101267.08A.pdf>

PRIMERO CASO				
Item	Cantidad	Dispositivo	Precio Unitario	Precio Total
1	4	Sensor LS7002	\$ 94.451,00	\$ 377.804,00
2	1	Procesador TLP-100	\$ 226.533,00	\$ 226.533,00
3	1	Software LTS2005	\$ 5.800,00	\$ 5.800,00
4	1	Registro de salida de datos en formato ASCII para otras aplicaciones de Software	\$ 2.175,00	\$ 2.175,00
5	1	Sistema de almacenamiento de imágenes	\$ 2.899,00	\$ 2.899,00
6	2	Sistema de notificación de alerta TWX300	\$ 3.683,00	\$ 7.366,00
7	2	Pantallas de 24" para el display del Sist. Alerta	\$ 920,00	\$ 1.840,00
8	4	Sensor BTM 300	\$ 11.600,00	\$ 46.400,00
9	4	Computadoras	\$ 700,00	\$ 2.800,00
			COSTO TOTAL	\$ 673.617,00

Tabla 2 Costo de la primera propuesta de Red

Para la segunda opción el costo se reduce considerablemente (\approx \$575.000) por el hecho de que se utilizaría sólo sensores de campo eléctrico (BTM 300) ubicados como se observa en la figura 4.18. Para este caso lo que se propone es que de ser favorable su implementación se considere el conectarse una red existente por ejemplo una red meteorológica (**ANEXO 6**) para la transmisión de datos, su costo de implementación se indica en la tabla 3.



Ilustración 4.18 Ubicación de los sensores segunda propuesta.

SEGUNDO CASO				
Item	Cantidad	Dispositivo	Precio Unitario	Precio Total
1	8	Sensor BT-D 300	\$ 11.600,00	\$ 92.800,00
2	8	Computadoras	\$ 700,00	\$ 5.600,00
COSTO TOTAL			\$	98.400,00

Tabla 3. Costo de la segunda propuesta de Red.

Con estas dos propuestas se tiene un punto de partida para la implementación de una red de detección de rayos en el país, la cual sería de ayuda para los siguientes usuarios finales:

- Meteorología
- Aviación
- Minería
- Sector Marítimo
- Seguros

- Eventos Deportivos
- Playas
- Energía (Generación, Transmisión, Distribución)
- Petroleras

Ahora bien, teniendo estas dos propuestas de red para una futura implementación la entidad pública que se haría responsable del proyecto sería la Secretaria de Gestión de Riesgos, la cual se encarga de garantizar la protección de personas y colectividades de los efectos negativos de desastres de origen natural o antrópico, mediante la generación de políticas, estrategias y normas que promuevan capacidades orientadas a identificar, analizar, prevenir y mitigar riesgos para enfrentar y manejar eventos de desastre; así como para recuperar y reconstruir las condiciones sociales, económicas y ambientales afectadas por eventuales emergencias o desastres [26].

5. CONCLUSIONES

Entre los fenómenos naturales que se producen cotidianamente está el rayo, el que según su intensidad puede ser más o menos peligroso. Existen medidas de prevención objetivo de este estudio que pueden evitar accidentes e incluso la muerte por exposición al mismo. Es por ello que para concluir este trabajo de tesis a continuación se exponen las conclusiones obtenidas a lo largo del trabajo.

- Debido a que el radio de cobertura de los sensores LS7002 a utilizarse es hasta 350 km, disminuye el número necesario para la implementación de la red y por ende el costo de implementación.
- Se debería considerar que una red híbrida expuesta en la sección 4.6 pues permitiría obtener información relevante sobre el fenómeno de las descargas atmosféricas (localización, tiempo, amplitud, etc.). Además esta red cuenta con su propio software para el procesamiento de datos y utiliza dos métodos para la ubicación de la descarga (TOA y MDF), procesos que no todos los sensores poseen.
- En cuanto a la segunda opción de red indicada en la sección 4.6, no debería ser desmerecida por el hecho de que su costo es relativamente menor comparado con la primera red o por el radio de cobertura que presentan. Hay que considerar que para una protección preventiva eficaz, es necesario detectar la tormenta antes de que se produzca este incremento brusco del campo eléctrico en la zona a proteger. Consecuentemente estos sensores presentan un nivel de eficiencia alta además de ayudar a identificar una tormenta desde su etapa inicial.
- Con las dos propuestas de red, lo que se pretendió es utilizar detectores de tormentas con tecnologías actuales que proporcionen información de la actividad eléctrica atmosférica fiable en tiempo real y monitorizada. Además que permitan tomar medidas de carácter temporal que eviten riesgos y aseguren los servicios más importantes.

- Para la implementación de una red de detección de rayos se recomienda utilizar sensores con un rendimiento superior al 90% como se especifica en la norma internacional IEC 62793. Pues la localización de la actividad nube-tierra es importante para las acciones preventivas.
- En el caso del establecimiento de una red de detección de rayos en el país sería importante considerar que hay redes existentes en Colombia específicamente en la frontera, lo cual sería de mucha ayuda al momento de la implementación. Pues dicha red al estar ubicada en la frontera disminuiría el número de sensores a utilizarse en el Ecuador ya que se podría compartir la información existente con el vecino país.
- Finalmente, en cuanto a la ubicación de los sensores el objetivo principal fue buscar lugares estratégicos es decir, se consideró diferentes factores como: labores que se desarrollan en el área y el impacto económico que ocasionaría el efecto de las descargas atmosféricas. Más sin embargo los lugares establecidos son sólo puntos de partida para las personas que tengan interés en la futura implementación de este proyecto.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. Holzworth , «World Wide Lightning Location Network (wwlln.net),» [En línea]. Available: <http://wwlln.net/>. [Último acceso: Junio 2017].
- [2] C. F. Gatica Salinas, «Determinación de la Resistencia de la Puesta a Tierra en Torres de Alta Tensión en función del arco inverso,» Santiago de Chile, 2012, p. 22.
- [3] H. Merchán y A. Mejía, «Potección Contra las Descargas Atmosféricas/ Seminario IEEE,» Cuenca, 2002, pp. 19-24.
- [4] A. Gutiérrez Segura y B. Pérez Barrientos, «Estudio sobre Protecciones contra Descargas Atmosféricas,» Poza Rica de Hidalgo, Veracruz, 2002, pp. 19-26.
- [5] J. M. Ángeles Sánchez y L. D. Mora Galicia, «Implementación del Modelo de Volúmen de Colección para la Protección contra Descargas Eléctricas Atmosféricas en la TDGL Poza Rica,» Poza Rica de HGO., 2010, p. p.37.
- [6] G. R. Tomas Laroj, «Actualización del Mapa Isoceráunico de Guatemala y su Influencia en el Diseño de Líneas de Transmisión,» Guatemala, 2004, pp. 1-17.
- [7] V. A. Rakov, «The Physics of Lightning,» Florida, Springer Science Business Dordrecht , 2013, pp. 701-702.
- [8] J. A. López Trujillo y I. E, «Metodología para la Predicción de Tormentas Eléctricas a partir de mediciones de Campo electrostático Ambiental y sistemas de localización de Rayos en Zona Montañosa,» Manizales, 2011, pp. 10-12.

- [9] R. Solomon, C. Adamo y M. Baker, «A lightning initiation mechanism: application to a thunderstorm electrification model,» C.R. Physique 3, 2002, pp. 1325-1333.
- [10] S. Cooper y D. Cain, «National Weather Service,» National Oceanic and Atmospheric Administration, [En línea]. Available: <http://www.srh.weather.gov/jetstream/tstorms/life.html>. [Último acceso: 19 Marzo 2017].
- [11] National Weather Service, [En línea]. Available: http://forecast.weather.gov/jetstream/lightning/hirez_72dpi.htm. [Último acceso: Septiembre 2017].
- [12] A. Alacaide Fernández, «Análisis Técnico y Normativo de los Sistemas de Protección contra Sobretensiones en España y Polonia,» Leganés, 2010, pp. 7-8.
- [13] T. Chronis, K. Cummins, R. Said, W. Koshak, E. McCaul, E. R. Williams, G. T. Stano y M. Grant, «Climatological diurnal variation of negative CG lightning peak current over the continental United States,» vol. 120, United States, American Geophysical Union, 2015, p. p. 584.
- [14] F. Pérez Puebla, M. Gutiérrez Núñez y J. F. López Ruiz, Analisis de las Intensidades de los Rayos registrados en la Península Ibérica en el período 1992-1995, Península Ibérica, 1992-1995, pp. 577-578.
- [15] J. R. Hermoso Costa, «Modelado y Estudio del Líder descendente negativo en una descarga eléctrica atmosférica y su influencia en la localización del punto de Impacto del Rayo,» Barcelona, 2012, pp. 32-39.
- [16] F. d. C. Magina, «SISTEMA DE ALERTA DE OCORRÊNCIA DE RAIOS UTILIZANDO REDE DE SENSORES DE CAMPO ELÉCTRICO ATMOSFÉRICO,» São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Especiales - INPE, 2016, pp. 25-50.

- [17] ecuadortouristique. [En línea]. Available: <https://ecuadortouristique.wordpress.com/lugares-turisticos/>. [Último acceso: Enero 2017].
- [18] wikipedia, Mayo 2001. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Regi%C3%B3n_interandina_del_Ecuador#/media/File:Ecuador_Topography.png.
- [19] C. N. d. E. y. Censos, «Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC),» [En línea]. Available: <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/censo-de-poblacion-y-vivienda/>. [Último acceso: 15 Enero 2017].
- [20] J. Cedeño y M. C. Donoso, «Atlas Pluviométrico del Ecuador,» Guayaquil, UNESCO 2010, 2010, pp. 1-8.
- [21] Instituto Oceanográfico de la Armada, «Derrotero de la Costa Continental e Insular del Ecuador,» Guayaquil, 2005, pp. 11-15.
- [22] Ecuavisa, Marzo 1697. [En línea]. Available: <http://www.ecuavisa.com/articulo/noticias/nacional/66829-autoridades-guayas-coordinan-medidas-preventivas-contrainino>. [Último acceso: Enero 2017].
- [23] Diario El Mercurio, Octubre 1924. [En línea]. Available: <http://www.elmercurio.com.ec/502337-preven-que-el-fenomeno-de-el-nino-sera-menos-fuerte/>. [Último acceso: Enero 2017].
- [24] Secretaria de Gestión de Riesgos, «Instituto de Meteorología e Hidrografía (INAMHI),» [En línea]. Available: <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/>. [Último acceso: Enero 2017].
- [25] Geoyasuni.org - Portal de Investigación Geográfica, [En línea]. Available: <http://www.geoyasuni.org/?p=915>. [Último acceso: Febrero 2017].
- [26] Secretaria de Gestión de Riesgos, «Instituto de Meteorología e Hidrografía (INAMHI),» [En línea]. Available: <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/>. [Último acceso: Enero 2017].

- [27] R. M. Lightfoot, «National Aeronautics and Space Administration - Global Change Master Directory,» Dr. Stephen Wharton, [En línea]. Available: https://gcmd.nasa.gov/records/GCMD_NLDN.html. [Último acceso: Junio 2017].
- [28] NASA MSFC an the University of Alabama in Huntsville, «Global Hydrology Resource Center,» [En línea]. Available: <https://lightning.nsstc.nasa.gov/otd/>. [Último acceso: 20 Enero 2017].
- [29] S. K. Schoonmaker, «European Cooperation for Lightning Detection,» [En línea]. Available: <http://www.euclid.org/>. [Último acceso: Junio 2017].
- [30] J. C. Inampué Borda, «Integración de los Sistemas de Alerta de Tormentas Eléctricas en Redes Inteligentes,» Bogotá, Colombia, 2014, pp. 48-61.
- [31] A. E. d. N. y. Certificación, «UNE-EN 50536 "Protección contral el rayo, Sistemas de aviso de tormentas ",» Madrid - España, AENOR, 2011, pp. 13-18.
- [32] D. Atallah, «Vaisala,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.isem.org.pe/files-public/portal/reuseg/2016/06/pdf/dario.pdf>. [Último acceso: Enero 2017].
- [33] J. Morejon, «Esmeraldas Provincia Verde,» Diciembre 2012. [En línea]. Available: <http://esprovinciaverde.blogspot.com/2012/12/clima-de-la-provincia.html>. [Último acceso: Diciembre].
- [34] «Secretaria de Hidrocarburos,» [En línea]. Available: <http://www.secretariahidrocarburos.gob.ec/>. [Último acceso: 2017].
- [35] G. T. Golup, «Tormentas Eléctricas, Rayos y Pararrayos,» Argentina, 2002, pp. 5-7.



IPL

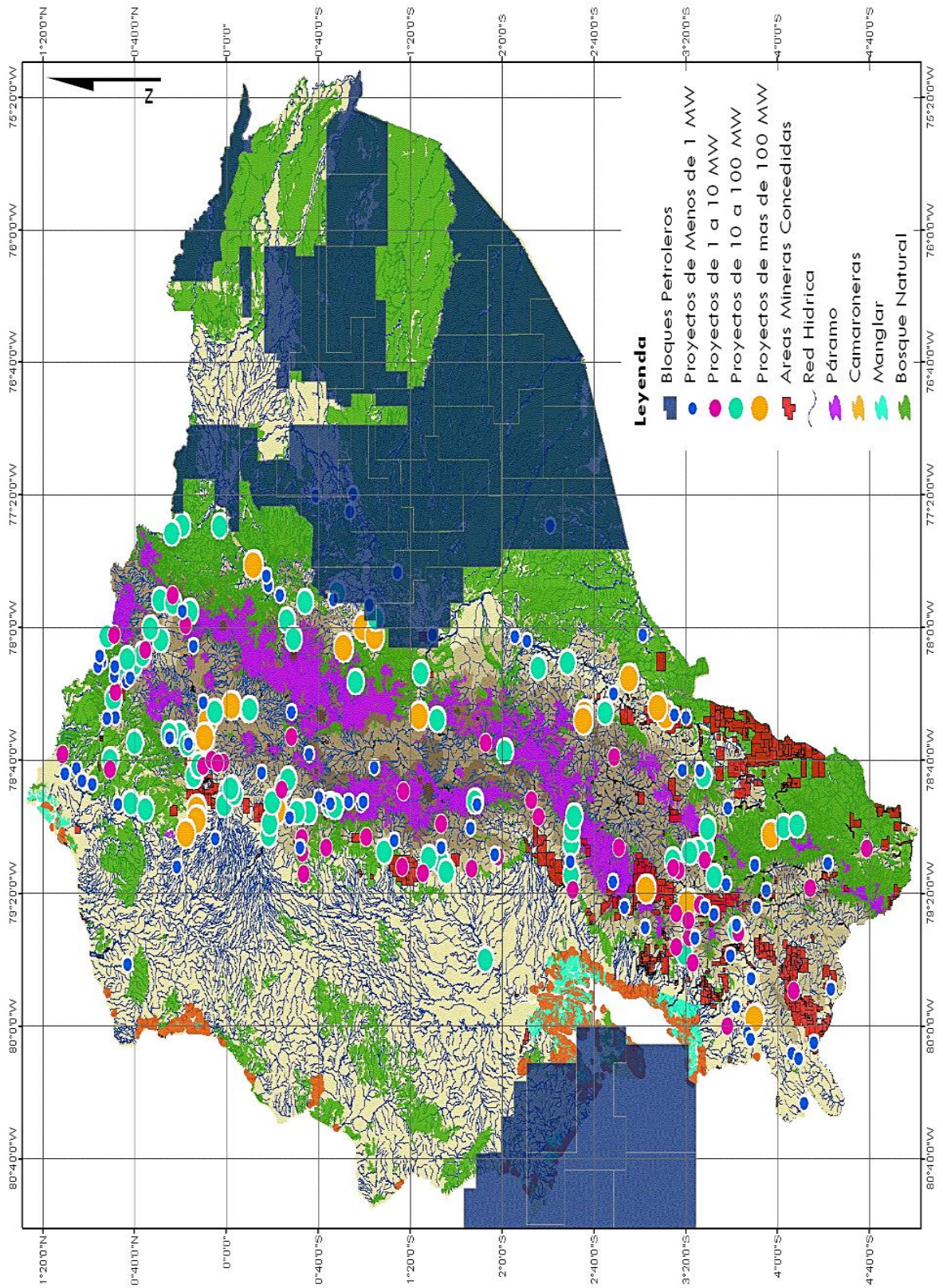
escola superior de tecnologia e gestão
instituto politécnico de leiria



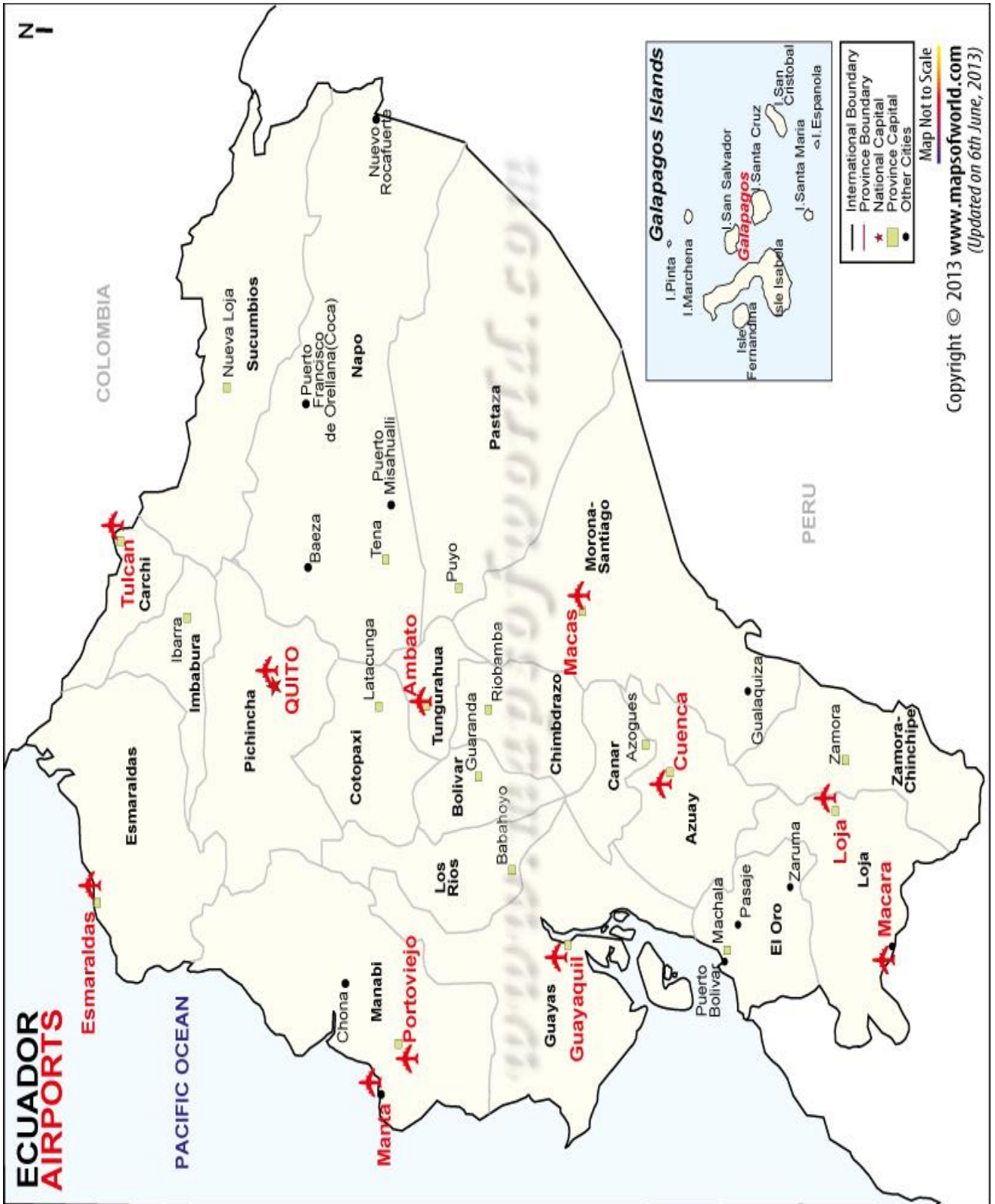
UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867

7. ANEXOS

Proyectos Hidroelectricos, Areas Mineras Concedidas, Bloques Petroleros, Camroneras Red Hidrica del Ecuador , Bosques Naturales, Paramo y Manglar

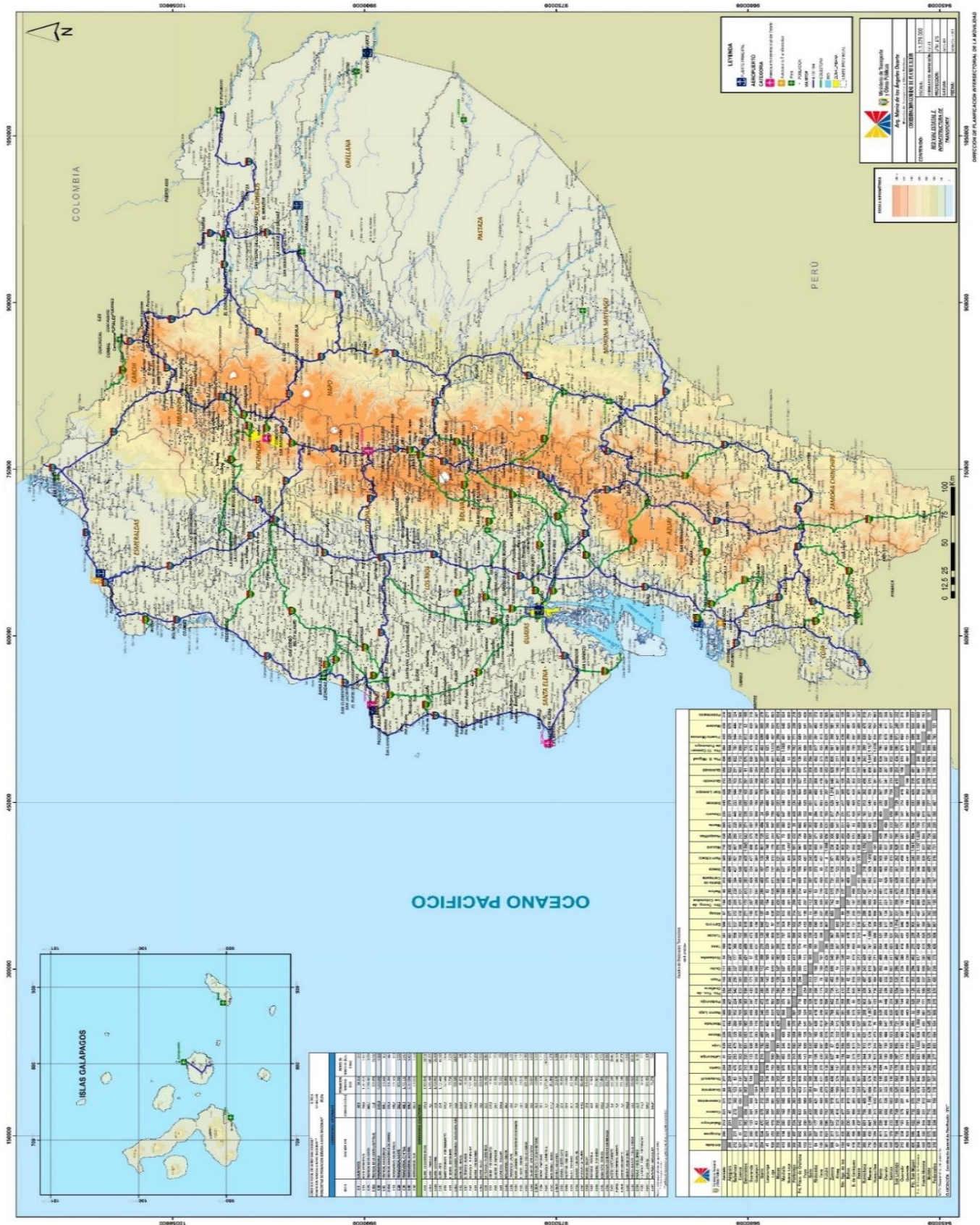


*Anexo2. Mapa de los proyectos desarrollados en el Ecuador
 Fuente: Secretaria de Hidrocarburos.*

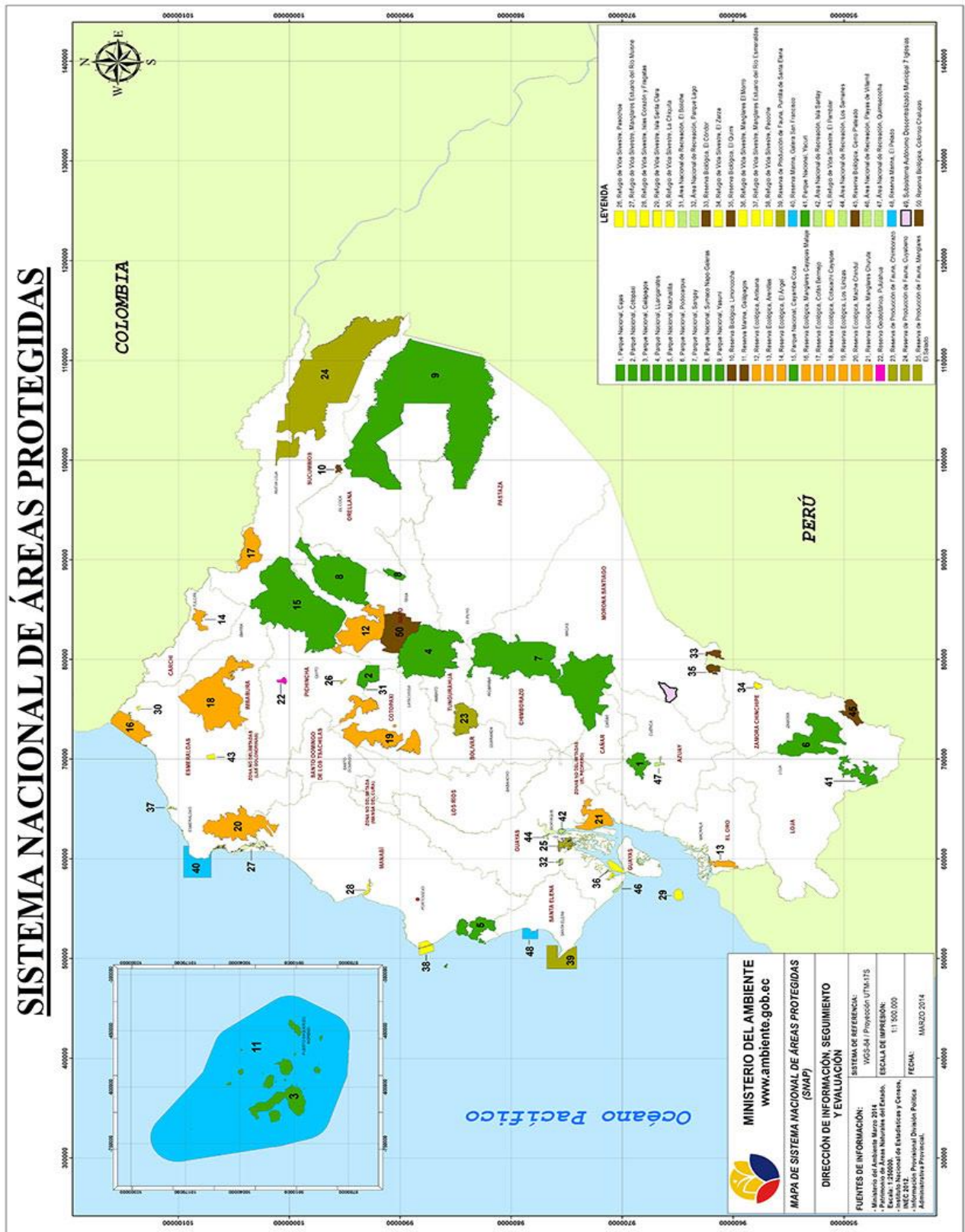


Anexo3. Mapa de la ubicación de los aeropuertos en Ecuador.

Fuente: Ministerio de Transporte y Obras Públicas.



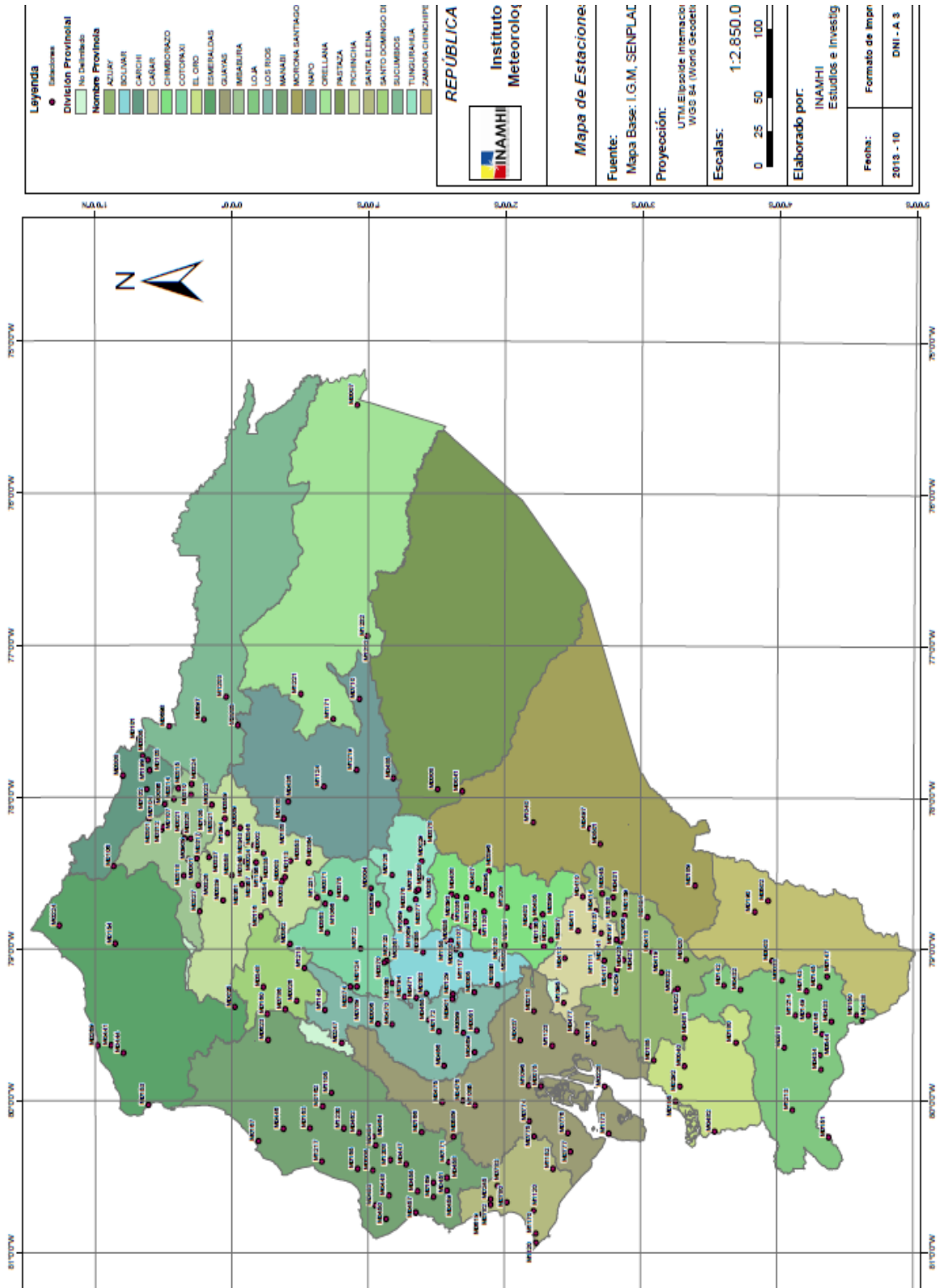
Anexo4. Mapa de la Red vial Estatal
 Fuente: Ministerio de Transporte y Obras Públicas.



Anexo5. Mapa del Sistema Nacional de Áreas Protegidas.
Fuente: www.ambiente.gob.ec

Mapa de Estaciones Meteorológicas

Mapa de Ubicación de Estaciones Meteorológicas



Anexo6. Mapa de las Estaciones Meteorológicas
 Fuente: SENPLADES, INAMHI



escola superior de tecnologia e gestão
instituto politécnico de leiria



UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867