UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Evaluación del riesgo por rayos para Colombia

Audrey Soley Cruz Bernal

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Bogotá, Colombia
2019

Evaluación del riesgo por rayos para Colombia

Audrey Soley Cruz Bernal I.E.

Trabajo final de maestría presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería Eléctrica

Director:
Profesor Horacio Torres Sánchez
Codirector:
Ph.D., Harby Daniel Aranguren Fino

Línea de Investigación
Descargas Eléctricas Atmosféricas
Grupo de Investigación
Programa de investigación sobre Adquisición y Análisis de Señales PAAS-UN

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Bogotá, Colombia
2019

Agradezco a Dios y La Santísima Virgen por bendecirme cada día y permitirme alcanzar un logro más en la vida.

Dedico este trabajo a mi mamá Blanca y mi papá Carlos, por la vida que me han dado, el amor, la dedicación, los consejos y el apoyo que me brindan todos los días para seguirme formando como persona y profesional. El mejor consejo que siempre tengo presente: despacio y con buena letra que del afán no queda sino el cansancio.

A mis hermanos Carlos e Ivette Kathleen por darme ejemplo, sé que cuento con ustedes en todo momento. A mi sobrina Karla por regalarme sus tiernas e inocentes sonrisas y a Gaby por su incondicional compañía, que cada uno de nuestros logros las impulsen a conseguir lo que se propongan.

A mi compañero de vida Enrique a quien admiro inmensamente y desde el día en que lo conocí me ha ofrecido las mejores herramientas para avanzar. Gracias por tu tiempo, por tu paciencia, por cada uno de tus consejos, por confiar siempre en mí y por orientarme con tu amplio conocimiento tanto personal como profesional. ¡Te Amhorokte!

De todo corazón les agradezco por estar siempre conmigo, por el apoyo incondicional, por escucharme y por los sabios consejos que me motivan cada vez que me siento derrotada. Solo ustedes saben el esfuerzo entregado durante esta etapa académica. ¡Los quiero demasiado!

Con cariño…

Audrey Soley Cruz Bernal

Agradecimientos

Al Prof. Horacio Torres que sin conocerme de años atrás depositó su confianza en mí y me hizo parte de su área de trabajo, brindándome su dirección y apoyo en todo momento para la elaboración de este trabajo.

Al Dr. Ing. Daniel Aranguren por dirigirme, por prestarme atención cuando le mostraba cada uno de los resultados que obtenía, por brindarme sus conocimientos y por los permisos que me aprobó para cumplir con mis actividades académicas. Muchas gracias por confiar en mí y hacerme parte de tu equipo de trabajo.

Al Dr. Ing. Enrique Rojas por asesorarme y ayudarme siempre a aterrizar conceptos e ideas durante mi formación en la maestría y también por sus aportes en la elaboración de mi trabajo final para entregarlo con la mejor calidad.

Al Prof. Ignacio Pérez por el tiempo que dedicó en las reuniones donde dialogamos sobre varios conceptos para realizar los análisis estadísticos adecuados durante la elaboración del trabajo.

A Keraunos S.A.S por permitirme ampliar mis conocimientos para así crecer profesionalmente y por facilitarme la información de la Red Colombiana de Detección de Rayos - LINET®. También agradezco a las buenas amigas que tengo July, Jeimy, Steffa y Clarita quienes se preocuparon por mí y me animaron a avanzar cada día.

.

Resumen

En el territorio colombiano, las condiciones meteorológicas están principalmente condicionadas por la zona de confluencia intertropical. Debido a esto, Colombia es una de las regiones con mayor actividad de rayos en el mundo, lo cual se refleja en un considerable número de muertos y heridos, y se asocia con la existencia de riesgo para la población en general. Este trabajo final de maestría evalúa y analiza el riesgo en seres humanos causado por rayos teniendo en cuenta las condiciones climatológicas y geográficas de Colombia (departamentos y subregiones naturales), la actividad de rayos en el país y la información obtenida a partir de diversas fuentes (gubernamentales y privadas).

En primera instancia, se llevó a cabo una revisión para unificar las definiciones de riesgo existentes en la literatura y se identificaron como factores que inciden en el riesgo por rayos: exposición, vulnerabilidad y peligrosidad (Nivel I). Este último factor, compuesto por distribución del suceso, intervalo de recurrencia y grado de peligrosidad (Nivel 2). Luego, se relacionaron los factores de riesgo identificados con varios parámetros del rayo. De esta manera, los factores que corresponden a la peligrosidad se asociaron a la densidad de descargas a tierra (DDT), el nivel ceráunico (NC) y la severidad o tormenta severa (S). Por su parte, la exposición se asoció a la densidad poblacional y la vulnerabilidad con todos los casos que fueron reportados como víctimas mortales por rayos.

Posteriormente, se desarrollaron y aplicaron varias metodologías para determinar cuantitativamente los factores de riesgo. En la primera metodología se definieron e identificaron veinte subregiones naturales en Colombia. En la segunda, a partir de las estadísticas que tiene el Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE), se encontró un total de 1313 muertes a causa de rayos para el periodo comprendido entre 1997 y 2017. Paralelo a esto, y para el mismo periodo de tiempo, se obtuvo la densidad de población a nivel nacional y por subregiones. La tercera metodología consistió en calcular la DDT, el NC y la S para toda Colombia. Estos parámetros del rayo fueron obtenidos para el periodo 2012-2017 a partir de la información suministrada por la red LINET®, administrada por la empresa Keraunos SAS.

En la parte final de este trabajo se desarrolló un estudio global de riesgo por rayos. Para esto, se analizó el riesgo tolerable por rayos haciendo uso de las curvas F-N, encontrando que el riesgo social en las subregiones naturales y, en general, en toda Colombia, se encuentra dentro del límite aceptable, según el valor típico de riesgo tolerable registrado en la Norma Técnica Colombiana NTC 4552-2. Finalmente, se plantean tres escenarios (modelos matemáticos) para la estimación del riesgo total por rayos, los cuales combinan los factores de riesgo previamente cuantificados (exposición, vulnerabilidad y peligrosidad). Luego de comparar los resultados obtenidos con los tres modelos se evidenció que, al hacer uso de cualquiera de las fórmulas, las subregiones naturales de Colombia que presentaron un mayor riesgo por rayos durante el periodo 2012-2017 fueron Llanura Caribe (LLC), Montaña Noroeste (MNOE), Valle del Cauca (VC) y Valle del Magdalena Medio (VMM).

Palabras clave: ALARP; densidad de descargas a tierra; descargas eléctricas atmosféricas; exposición; nivel ceráunico; peligrosidad; rayos; riesgo; riesgo por rayos; riesgo tolerable; severidad; subregiones naturales; tormenta severa; vulnerabilidad.

Abstract

In the Colombian territory, the meteorological conditions are mainly conditioned by the intertropical convergence zone. Due to this, Colombia is one of the regions with the highest activity of lightnings in the world, which is reflected in a considerable number of deaths and injuries, and it is associated with the existence of risk for the population. This final master's degree project evaluates and analyzes the risk in humans caused by lightnings, considering the climatic and geographical conditions of Colombia (departments and natural subregions), lightning activity in the country and information obtained from several sources (governmental and private).

In the first instance, a review was carried out to unify the definitions of risk existing in the literature and the factors that affect the risk of lightnings were identified: exposure, vulnerability and dangerousness (Level I). This last factor, composed by distribution of the event, recurrence interval and degree of danger (Level 2). Then, the identified risk factors were related to various parameters of the lightning. In this way, the factors that correspond to the dangerousness were associated with the ground flash density (GFD), the keraunic level (KL) and the severity or severe storm (S). On the other hand, the exposure was associated with population density and the vulnerability was related to all the cases that were reported as fatalities by lightnings.

Subsequently, several methodologies were developed and applied to quantitatively determine the risk factors. In the first methodology, twenty natural subregions were defined and identified in Colombia. In the second one, from the statistics held by the Departamento Administrativo Nacional de Estadisticas (DANE), a total of 1313 deaths by lightnings was found for the period between 1997 and 2017. Parallel to this, for the same period of time, population density was obtained at national level and by subregions. The third methodology consisted in calculating the GFS, the KL and the S for all of Colombia. These lightning parameters were obtained for the period 2012-2017 from the information provided by the LINET® network, managed by the company Keraunos SAS.

In the final part of this work, a global study of lightning risk was developed. For this, the tolerable risk was analyzed using the F-N curves, finding that the social risk of lightnings in the natural subregions and, in general, in all of Colombia, is within the acceptable limit, according to the typical value of tolerable risk registered in the Colombian Technical Standard NTC 4552-2. Finally, three scenarios (mathematical models) are proposed for estimating the total risk of lightnings, which combine the previously quantified risk factors (exposure, vulnerability and dangerousness). After comparing the results obtained with the three models, it was evident that, when making use of any of the formulas, the natural subregions of Colombia that presented the highest risk of lightnings during the 2012-2017 period were Llanura Caribe (LLC), Montaña Noroeste (MNOE), Valle del Cauca (VC) y Valle del Magdalena Medio (VMM).

Keywords: ALARP; atmospheric electric discharges; dangerousness; exposure; ground flash density; keraunic level; lightning; natural subregions; risk; risk of lightnings; severe storm; severity; tolerable risk; vulnerability.

Contenido

Pág.

1 Introducción ... 17

1.1 Identificación del problema ... 18

1.2 Objetivos ... 18

1.3 Metodología ... 19

1.4 Estructura del Documento ... 19

1.5 Productos Académicos ... 20

1.5.1 Productos propios del trabajo ... 20

1.5.2 Productos complementarios ... 20

2 Marco teórico ... 21

2.1 Fenómeno del rayo ... 21

2.2 Estudios sobre mortalidad por rayos en el mundo ... 24

2.3 Riesgo ... 27

3 Mortalidad a causa de rayos en Colombia ... 33

3.1 Geografía de Colombia ... 33

3.2 Recopilación de Datos ... 36

3.3 Mortalidad ... 37

3.3.1 Mortalidad por rayos en las subregiones naturales ... 42

3.3.2 Mortalidad por rayos en departamentos ... 44

4 Estimación de los parámetros del rayo en Colombia ... 47

4.1 Red Colombiana de detección total de rayos ... 47

4.2 Nivel Ceráunico (NC) ... 48

4.3 Densidad de Descargas a Tierra (DDT) ... 50

4.4 Severidad (S) ... 54

5 Propuesta para calcular el riesgo por rayos ... 61

5.1 Factores que influyen en la estimación del riesgo por rayos ... 61

5.2 Modelo para la estimación del riesgo por rayos ... 65

5.2.1 Escenario 1: producto de factores ... 66

5.2.2 Escenario 2: producto en por unidad sumando los factores de peligrosidad 67
5.2.3 Escenario 3: sumatoria en por unidad 68
6 Evaluación del riesgo por rayos en Colombia 69
6.1 Riesgo tolerable por rayos 69
6.2 Riesgo general por rayos 71
6.2.1 Escenario 1: producto de factores 71
6.2.2 Escenario 2: producto en por unidad sumando los factores de peligrosidad 71
6.2.3 Escenario 3: sumatoria en por unidad 72
6.2.4 Discusión 73
7 Conclusiones y trabajos futuros 75
7.1 Conclusiones 75
7.2 Trabajos futuros 78
Referencias 79
A. Anexo A: Máxima actividad de rayos por año y subregión natural 83
B. Anexo B: Riesgo Tolerable por Subregión Natural 85

Índice de Figuras

Pág.

Figura 2.1 Tipos de rayos. (a) Dentro de la propia nube, (b) Intra-Nube, (c)Nube-Ionósfera, (d) Nube-aire, (e) Nube-tierra o tierra-nube 22
Figura 2.2 Niveles de los factores de riesgo 29
Figura 2.3 Principio ALARP 30
Figura 2.4 Curva F-N 31
Figura 3.1 Tipos de pisos térmicos en Colombia 34
Figura 3.2 Subdivisión de regiones naturales para Colombia 35
Figura 3.3 Plataforma del DANE para obtener la información de defunciones ocurridas en el país ... 36
Figura 3.4 Mortalidad anual a causa de rayos en Colombia para el período 1997-2017 38
Figura 3.5 Mortalidad mensual a causa de rayos en Colombia para el periodo 1997-2017 38
Figura 3.6 Tasa de mortalidad en Colombia para el período 1997-2017 40
Figura 3.7 Tasa de mortalidad específica en el área rural y urbana para el período 1997-2017 41
Figura 3.8 Tasa de mortalidad por sexo (masculino - femenino) para el período 1997-2017 41
Figura 3.9 Parámetros que conforman la *base de datos* sobre muertes por rayos. 42
Figura 3.10 Mapa de muertes por rayos en las subregiones naturales para el periodo 1997-2017 42
Figura 3.11 Mortalidad y tasa de mortalidad a causa de rayos en las subregiones naturales 43
Figura 3.12 Mortalidad y tasa de mortalidad a causa de rayos por departamento 44
Figura 4.1 Red Colombiana de Detección Total de Rayos 47
Figura 4.2 Pasos para calcular el Nivel Ceráunico 48
Figura 4.3 Pasos para calcular la Densidad de Descargas a Tierra 50
Figura 4.4 Distribución acumulada de corriente 51
Figura 4.5 Distribución acumulada de corriente (Ajustada) 52
Figura 4.6 Valor promedio de la DDT anual en cada subregión natural 52
Figura 4.7 Mapa de DDT para Colombia durante el periodo comprendido entre 2012 - 2017 54
Figura 4.8 Cantidad de flashes por minuto en la subregión Valle del Magdalena Medio 56
Figura 4.9 Cantidad máxima de flashes que impactaron en un minuto 57
Figura 4.10 Percentil 95 (P_{95}) en la subregión del Valle del Magdalena Medio en el año 2015 58
Figura 4.11 Cantidad de rayos mensual con el P95 59
Figura 5.1 Densidad poblacional desde 2012 hasta 2017 en las subregiones naturales de Colombia ... 63
Figura 6.1 Curva F-N del riesgo por rayos 70
Figura 6.2 Riesgo por rayos obtenido en el Escenario 1 (prueba 4) 71
Figura 6.3 Riesgo por rayos obtenido en el Escenario 2 72
Figura 6.4 Riesgo por rayos obtenido en el Escenario 3 (prueba 4) 73
Figura 6.5 Mapa de peligrosidad para el año 2017 74

Índice de Tablas

Pág.

Tabla 2.1 Parámetros del rayo 23
Tabla 2.2 Resumen de muertes por rayos a Nivel mundial 25
Tabla 2.3 Resumen de muertes por rayos en el Sur y Centro América 26
Tabla 2.4 Enfoques del riesgo natural 28
Tabla 2.5 Comparación de probabilidad de muertes para un individuo por año de exposición 32
Tabla 3.1 Topografía de Colombia 33
Tabla 3.2 Tasa de mortalidad anual y multianual en Colombia 39
Tabla 3.3 Valoración de la tasa de mortalidad multianual para cada subregión natural 43
Tabla 3.4 Valoración de la tasa de mortalidad multianual por departamento 45
Tabla 4.1 Nivel Ceráunico promedio en Colombia desde 2012 hasta 2017 49
Tabla 4.2 DDT promedio desde el año 2012 hasta el año 2017 53
Tabla 4.3 Top 9 de los lugares con mayor actividad de rayos en Colombia y Venezuela 55
Tabla 4.4 Percentil 95 (P95) anual en cada subregión natural 58
Tabla 5.1 Población para cada subregión natural desde 2012 hasta 2017 en Colombia 63
Tabla 5.2 Dimensiones de la vulnerabilidad 64
Tabla 5.3 Vulnerabilidad: tanto por uno de pérdidas respecto al total expuesto 65
Tabla 5.4 Peso porcentual para cada uno de los factores de Nivel I y Nivel II 68
Tabla 6.1 Datos de la Curva F-N para analizar el riesgo por rayos en Colombia 70

Lista de Símbolos y abreviaturas

A continuación, se incluyen las siglas usadas en el presente trabajo.

A: Alto
ALARP: As Low As Reasonably Practicable
(tan bajo como sea razonablemente posible)
AC: Altiplano Cundiboyacense
AP: Altiplano Popayán
AM: Alto Magdalena
AZ: Amazonía
B: Bajo
CT: Catatumbo
DDT: Densidad de Descargas a Tierra
LLC: Llanura Caribe
LLCP: Llanura Costera del Pacífico
LLG: Llanura Guajira
M: Medio
MC: Montaña Centro
MNE: Montaña Noreste
MNO: Montaña Noroeste
MS: Montaña Sur
NC: Nivel Ceráunico
OQ: Orinoquía
P: Peligrosidad
PF: Pacífico
PA: Piedemonte Amazónico
PLL: Piedemonte Llanero
R: Riesgo
RR: Riesgo por Rayos
S: Severidad
SB: Serranía del Baudó
SN: Sierra Nevada
SRN: Subregión Natural
TM: Tasa de Mortalidad
TMM: Tasa de Mortalidad Multianual
VC: Valle del Cauca
VMM: Valle del Magdalena Medio

1 Introducción

Las descargas eléctricas atmosféricas, más conocidas como rayos, son un fenómeno físico que se caracteriza por la transferencia de carga eléctrica (positiva o negativa) a lo largo de la nube, generando así altas corrientes. La transferencia de carga se puede dar entre nube-tierra o tierra-nube, entre nube y aire, entre nubes, al interior de la nube (intranube) o entre nube-ionósfera, y de esta manera, se originan las tormentas eléctricas. Además, este fenómeno eléctrico transforma la energía eléctrica en otros tipos de energía, de forma que se manifiesta siendo visible y audible. Es visible debido a que las moléculas de aire se ionizan por el paso de la corriente eléctrica formando así el relámpago (luz) y es audible cuando al generarse el rayo se aumenta la temperatura del aire, de manera que, al mezclarse con el aire frío que se encuentra a los alrededores, se generan ondas de choque las cuales originan los truenos (sonido).

Desde el siglo XVIII hasta la actualidad, científicos e investigadores han estudiado el fenómeno del rayo, y a medida que aumentaron los estudios sobre este fenómeno atmosférico se establecieron parámetros científicamente mensurables. Como resultado de estas investigaciones en 1980, *Anderson* y *Eriksson* presentaron ante el comité CIGRÉ WG 33.01 más de 15 parámetros del rayo. Sin embargo, en el año 2000, el mismo comité estableció organizar en cinco grupos los siguientes parámetros del rayo: incidencia, amplitud de la corriente de retorno del rayo, carga, energía y forma del impulso de la corriente de rayo. Dichos parámetros muestran el comportamiento de los rayos en el tiempo y el espacio. En los parámetros de incidencia se encuentran: el Nivel Ceráunico (NC), la Densidad de Descargas a Tierra (DDT), la polaridad, la multiplicidad y la duración, los cuales permiten tener información detallada sobre el fenómeno del rayo [1].

Durante más de 30 años, el fenómeno del rayo ha sido tema de investigación a nivel nacional. Esto se debe en buena medida a la ubicación geográfica del país, ya que se encuentra dentro de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), donde se presenta la mayor actividad de rayos. La ZCIT se forma cuando los vientos cálidos y húmedos de las latitudes al norte y al sur del Ecuador (confluencia de los vientos alisios de ambos hemisferios) chocan formando un cinturón de nubes alrededor de la tierra sobre la región tropical generando bajas presiones y tormentas. Entre enero y febrero la zona inicia el recorrido de sur a norte y entre julio y agosto de norte a sur provocando temporadas lluviosas. De esta manera, en Colombia se presentan dos temporadas de lluvia: la primera se presenta entre abril-mayo y la segunda entre octubre-noviembre, lo cual afecta gran parte del país. Los meses restantes se conocen como temporadas secas. Debido a esto, los países que se encuentran dentro de la zona tropical del planeta no tienen estaciones como en las latitudes medias.

1.1 Identificación del problema

Uno de los fenómenos meteorológicos que se presenta con mayor frecuencia en diferentes lugares del mundo son las tormentas eléctricas, allí se generan las descargas eléctricas atmosféricas o rayos, los cuales, debido a su poder energético, representan un riesgo para el medio ambiente y la sociedad. No obstante, los rayos no son el único riesgo que producen las tormentas eléctricas. A partir de estas, también se generan otros fenómenos que representan riesgo como los tornados, vientos intensos, granizo e inundaciones repentinas, los cuales, dependiendo de muchos factores, pueden generar desastres naturales. De manera específica, los rayos ocasionan accidentes tales como lesiones y pérdidas en los seres humanos, así como daños en sistemas e instalaciones eléctricas afectando en gran medida el funcionamiento de éstos.

El estudio de los rayos en el mundo ha sido tarea de investigadores y científicos por más de un siglo, y en Colombia, debido a sus altas tasas de ocurrencia, ha sido tema de estudio por más de 30 años. Adicionalmente, las noticias y reportes de muertes o heridos por rayos, tanto a nivel nacional como a nivel internacional, se han vuelto más frecuentes y más visibles para la sociedad, especialmente en aquellas zonas donde las actividades diarias que realizan las personas son al aire libre y están expuestas a diferentes tipos de riesgos naturales (desde recibir los rayos ultravioletas del sol hasta ser impactados por un rayo).

Para todos los tipos de riesgos existen medidas de protección y prevención, tanto para los seres humanos, como para las infraestructuras. Generalmente, la protección va orientada en gran medida a diversos tipos de estructuras con el fin de que las personas se puedan resguardar en estas. De esta forma, para los impactos de rayos, el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE), basado en la Norma Técnica Colombiana (NTC 4552), obliga a que todo tipo de estructura debe contar con un Sistema Integrado de Protección contra Rayos (SIPRA) con el propósito de salvaguardar la vida humana y proteger los equipos expuestos. De esta manera, todos los lugares en los cuales exista un alto índice de exposición de personas deben estar protegidos o tener las medidas mínimas para proteger la vida humana ante una tormenta eléctrica.

A Nivel nacional, el Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE) ha registrado una estadística anual promedio de 63 muertes por rayos desde el año 1997 hasta el año 2017. Esto indica que, aproximadamente cada 6 días, muere una persona al ser impactada por un rayo. Por otra parte, muchos de los casos registrados se concentran en ciertos lugares del país, generando un alto riesgo para la población que allí habita. Desde esta perspectiva, este trabajo considera la necesidad de realizar una metodología que permita analizar y evaluar los diferentes factores, tanto geográficos como climatológicos, que inciden en el riesgo por rayos en seres humanos. Así mismo, se busca cuantificar el riesgo por rayos para evaluar alternativas de mitigación y encontrar un valor de riesgo por rayos tolerable para Colombia.

1.2 Objetivos

Objetivo general

Evaluar y analizar el riesgo en seres humanos causado por rayos en Colombia teniendo en cuenta las condiciones fisiográficas y climatológicas.

Objetivos específicos

1. Identificar los principales factores que inciden en el riesgo por rayos.
2. Realizar una metodología para evaluar el riesgo causado por rayos con base en los factores previamente identificados.
3. Analizar el riesgo tolerable debido a rayos en Colombia.

1.3 Metodología

Procurando cumplir con los objetivos planteados para este trabajo final de maestría se establecieron unas actividades, las cuales se fueron desarrollando como se muestra a continuación:

- Se recopiló la bibliografía necesaria para conocer el estado del arte a nivel internacional y nacional sobre muertes de personas por rayos.
- Para la evaluación del riesgo por rayos, se llevó a cabo una búsqueda sobre metodologías de cálculo de riesgo con el fin de apropiarlo, abordarlo y adoptarlo en el tema de rayos. Asimismo, se determinaron los parámetros de peligrosidad, vulnerabilidad y exposición los cuales son necesarios para la evaluación del riesgo por rayos.
- Se seleccionaron veinte subregiones naturales de acuerdo con las condiciones climatológicas y fisiográficas de Colombia para evaluar el riesgo por rayos en cada una de ellas.
- Las estadísticas de muertes causadas por rayos en Colombia se tomaron de la información que ofrece la plataforma del Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE). La información se filtró por departamento, municipio, género, edad, área y otras variables que fueron estudiadas a lo largo de la investigación. A partir de las estadísticas recolectadas se determinó el número de muertes a causa de rayos y se calculó la tasa de mortalidad para cada subregión natural y para cada departamento de Colombia. Adicionalmente, la información analizada de muertes por rayos se usó para determinar los parámetros de vulnerabilidad y exposición.
- Se estudió el parámetro de peligrosidad y se dividió en tres indicadores: el Nivel Ceráunico (NC), la Densidad de Descargas a Tierra (DDT) y la Severidad (S). Estos parámetros se analizaron en cada subregión natural y se calcularon desde el año 2012 hasta el año 2017, empleando la Red Colombiana de Detección Total de Rayos.
- Se analizaron los datos obtenidos y se calcularon los parámetros e indicadores antes descritos. Estos resultados fueron consolidados en cada factor que incide en el riesgo por rayos.
- Se realizó la identificación (cuantificación) del riesgo general y el riesgo tolerable en Colombia.

1.4 Estructura del documento

Como se ha visto hasta el momento, el capítulo 1 presenta la introducción, identificación del problema, objetivos, metodología y los productos académicos obtenidos durante el estudio de riesgo por rayos. Ahora bien, con el fin de abordar el tema que es objeto de estudio, el capítulo 2 presentará brevemente los conceptos básicos sobre el fenómeno del rayo y los conceptos generales sobre la identificación, el análisis y la evaluación del riesgo. Además, se presentará una síntesis de los estudios más relevantes sobre mortalidad por rayos a nivel internacional y nacional. Teniendo en cuenta que el Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE) permite obtener los registros sobre defunciones por

diferentes causas, en el capítulo 3 se mostrarán y analizarán las estadísticas sobre mortalidad por rayos para cada subregión natural y cada departamento de Colombia.

Teniendo en cuenta los objetivos, el alcance y la información presentada a lo largo del trabajo, el capítulo 4 presenta la metodología propuesta y empleada para obtener la información de los parámetros del rayo en todas las subregiones naturales de Colombia. Con el fin de desarrollar una aproximación de riesgo por rayos en Colombia, en el capítulo 5 se presentará la relación existente entre el fenómeno del rayo y el riesgo. De esta manera, se relacionarán los factores de riesgo y los parámetros del rayo, los cuales al final del capítulo se entenderán como un solo término. Luego, se juntarán todos los factores de peligrosidad, exposición y vulnerabilidad dando paso a la fórmula matemática propuesta en este estudio para calcular el riesgo por rayos. Finalmente, en el capítulo 6 se presentarán los resultados sobre el riesgo en general y el riesgo tolerable por rayos estimado para el territorio colombiano.

1.5 Productos Académicos

Los siguientes son los productos académicos obtenidos durante el desarrollo de este trabajo final de maestría y relacionados con el alcance de los objetivos planteados.

1.5.1 Productos propios del trabajo

Audrey Soley Cruz-Bernal, Horacio Torres-Sánchez, Harby Aranguren-Fino, Juan Carlos Inampués-Borda. "Lightning mortality rate in Colombia for the period 1997 – 2014", Revista UIS Ingenierías Vol. 17, no. 2, pp. 65-74, julio 2018.

1.5.2 Productos complementarios

H. Rojas, **A. Cruz**, C. Cortés. "Characteristics of lightning-generated electric fields measured in the Bogotá Savanna, Colombia" Revista UIS Ingenierías Vol. 16, no. 2, pp. 243-252, julio 2017.

D. Aranguren, J. González, **A. Cruz**, J. Inampués, H. Torres, P. Sarmiento Pérez-Tobón. "Lightning strikes on Power Transmission Lines and Lightning Detection in Colombia" XIV International Symposium on Lightning Protection (SIPDA), Natal, Brazil, 2nd – 6th October 2017.

D. Aranguren, J. González, **A. Cruz**, J. Inampués, H. Torres. "El tiempo severo en la confiabilidad de sistemas de transmisión y distribución en Colombia" V Congreso CIER de la Energía (COCIER), Medellín, Colombia, 28 noviembre – 01 diciembre 2017.

J. Inampués, D. Aranguren, **A. Cruz**, J. González, H. Torres, H. Betz. "Severe Thunderstorms in the Colombia and Venezuela high lightning active areas" XIV International Symposium on Lightning Protection (SIPDA), Natal, Brazil, 2nd – 6th October 2017.

C. Tovar, E. Muñetones, E. Pérez, D. Aranguren, **A. Cruz**, J. González, H. Torres. "Influence of lightning activity on Oil industry: Colombian Case" XIV International Symposium on Lightning Protection (SIPDA), Natal, Brazil, 2nd – 6th October 2017.

2 Marco teórico

2.1 Fenómeno del rayo

La atmósfera terrestre, vista en forma simplificada desde el punto de vista eléctrico como el espacio entre la ionósfera y la tierra, es un sistema con un flujo de corriente eléctrica, el cual busca mantenerse en equilibrio por medio de las tormentas eléctricas [2]. Una tormenta eléctrica es un fenómeno meteorológico en el cual se produce una gran liberación de energía y se manifiesta por medio de precipitaciones acompañadas de vientos con rachas que pueden ser muy fuertes y descargas eléctricas atmosféricas las cuales pueden ocurrir individualmente, en grupos o con diferentes tipos de patrones.

Las descargas eléctricas atmosféricas, más conocidas como rayos, ocurren a través de una transferencia de carga eléctrica donde se generan altas corrientes y estas se manifiestan en forma de energía lumínica (relámpago) y energía audible (trueno) [3]. La energía lumínica permite que el rayo sea visible debido a que las moléculas de aire se ionizan por el paso de la corriente eléctrica formando así el relámpago (luz) y es audible cuando al generarse el rayo se aumenta la temperatura del aire por lo que, al mezclarse con el aire frío que se encuentra a los alrededores, se generan ondas de choque las cuales originan los truenos (sonido).

Generalmente, los rayos se asocian a la existencia de una nube, aunque "no todas las nubes dan lugar a descargas eléctricas, ni todas las nubes que dan lugar a descargas eléctricas tienen las mismas características [4]". En este contexto, existe un modelo general llamado "célula tormentosa", en el cual una nube individual da lugar a las descargas eléctricas atmosféricas. Este modelo se conforma de cuatro etapas las cuales se muestran a continuación de acuerdo como se menciona en la norma IEC 62793 [5].

- Etapa 1: Es la *fase de desarrollo* y se asocia al proceso en que se crea la tormenta y el campo electrostático sube considerablemente a nivel de la tierra.
- Etapa 2: Es la *fase de crecimiento* que se caracteriza por la aparición de los primeros rayos entre nubes. En algunas ocasiones la descarga se produce entre nube-tierra.
- Etapa 3: Se considera la *fase de madurez* en la cual se producen precipitaciones de lluvia, nieve o granizo y descargas eléctricas nube-tierra (o tierra-nube) e intranube las cuales aumentan en su frecuencia de aparición.
- Etapa 4: La *fase de disipación* es cuando el campo electrostático se reduce hasta los niveles normales del buen tiempo. Por lo tanto, disminuyen progresivamente las precipitaciones y ráfagas de viento, es decir, que la nube desaparece.

Las cuatro etapas mencionadas anteriormente tienen un tiempo de duración que depende de la severidad del fenómeno, en donde se tienen tormentas eléctricas que pueden durar 1 hora, hasta las más severas con 10 horas o más. Además, durante la fase de madurez pueden existir diferentes tipos de rayos como se muestran en la Figura 2.1, siendo estas: (a) Dentro de la propia nube, (b) Intra-Nube, (c) Nube-Ionósfera, (d) Nube-aire, (e) Nube-tierra o tierra-nube. Un rayo puede alcanzar una temperatura de

30.000°C y tener más de 8 kilómetros de longitud. Sólo el 25 % de los rayos impactan en la tierra (rayos nube-tierra o tierra-nube), y aunque es un porcentaje bajo, el daño que causa en los sistemas e instalaciones eléctricas es demasiado alto [3], así como ocasionan gran cantidad de muertes y lesiones en seres humanos.

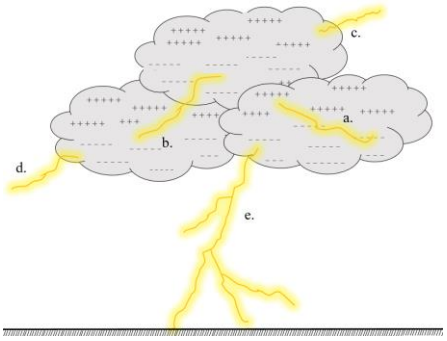


Figura 2.1 Tipos de rayos. (a) Dentro de la propia nube, (b) Intra-Nube, (c)Nube-Ionósfera, (d) Nube-aire, (e) Nube-tierra o tierra-nube
Fuente: Autora

Los rayos que se producen entre las nubes y la tierra se clasifican en dependiendo de la dirección y la polaridad (positiva o negativa). Por lo general, el tipo de rayo nube–tierra de polaridad negativa es aquel que se ha estudiado con mayor frecuencia debido a la gran cantidad de registros y mediciones existentes en el mundo. Su ocurrencia es superior al 90 %, mientras que los rayos nube–tierra de polaridad positiva se han encontrado en el orden del 5 % y 10 %. Este último tipo de rayo aumenta su ocurrencia durante el invierno en zonas templadas [6] y de acuerdo con varios autores, en la zona tropical existen regiones y diferentes meses del año en que la cantidad de rayos positivos puede ser mayor que los negativos [7]–[9].

Además de su ocurrencia y polaridad, para el estudio y caracterización de los rayos se han empleado diversos parámetros, los cuales fueron establecidos por investigadores, científicos e ingenieros que han estudiado este fenómeno por más de un siglo. En dicho ejercicio se han establecido más de quince parámetros mensurables, los cuales se consideran de suma importancia en el conocimiento científico y tecnológico de los rayos. Siendo así, es más fácil entender su comportamiento en el tiempo y el espacio, así como la relación con otros fenómenos naturales, mientras el conocimiento tecnológico permite realizar un diseño óptimo, así como establecer una protección adecuada para seres vivos, equipos eléctricos y electrónicos [3]. De esta manera, se garantiza una operación confiable y segura en los sistemas e instalaciones eléctricas.

El comportamiento y los resultados obtenidos de los parámetros del rayo para zona tropical explican que "*las magnitudes de los parámetros del rayo utilizados en aplicaciones en ingeniería varían espacial y temporalmente*" [7]. Siendo así, en el año 2000 el Consejo Internacional de Grandes Redes Eléctricas (CIGRÉ) aprobó considerar las variaciones espaciales y temporales. La variación temporal se refiere a que los rayos se caracterizan por la variación en diferentes escalas de tiempo (diaria, mensual, anual y multianual), mientras que la variación espacial es cuando la magnitud varía a nivel global, regional y local. La Tabla 2.1 muestra los parámetros del rayo organizados en cinco grupos conforme a lo estipulado por el comité CIGRÉ WG 33.01.

Tabla 2.1 Parámetros del rayo

Grupo	*Parámetro*	Descripción	Unidad de medida y observaciones adicionales
Incidencia	*Nivel Ceráunico (NC)* *(Keraunic level - KL)*	Es el número de días tormentosos al año. En [10] y [11] se demuestra que el Nivel Ceráunico es mayor en zonas tropicales que en zonas templadas.	• Se utiliza cuando no se dispone de mediciones directas de DDT. • Varía anualmente debido a que el rayo es un fenómeno atmosférico y, por lo tanto, tiene asociados factores climatológicos y meteorológicos. • Los mapas de NC permitieron dar las primeras aproximaciones cuantitativas de la actividad de rayos durante diferentes épocas del año y para diferentes regiones del mundo.
	Densidad de Descargas a Tierra (DDT) *(Ground Flash Density - GFD)*	Es el número de rayos nube-tierra que impactan la tierra en un área de 1 km^2 al año.	Se puede obtener a través de dos métodos: el primero son las mediciones indirectas con equipos contadores de rayos, sistemas de localización de rayos o con sistemas ópticos instalados en satelitales [12], [13]; el segundo método se relaciona con el uso de ecuaciones empíricas que relacionan la DDT con el Nivel Ceráunico.
	Polaridad (P) *(Flash polarity)*	La polaridad del rayo puede ser positiva o negativa.	Generalmente, la relación de la polaridad depende de la ubicación geográfica, tipo de sistemas de tormenta, entre otras [14].
	Multiplicidad (M) *(Multiple stroke rayos)*	Es el número de *strokes* que componen un *flash*	
	Duración	Duración total del *flash* o intervalo entre *strokes*.	Unidad de medida milisegundos o segundos
Amplitud de la corriente de retorno del rayo ***(Lightning peak current amplitude)***		Amplitud máxima de la corriente del rayo.	Es el valor pico de la onda de corriente de la descarga de retorno. Se considera el parámetro más importante para aplicaciones en ingeniería. Su unidad de medida se da en kA.
Carga ***(Charge)***		Valor total de carga asociado con la primera descarga y descargas subsecuentes.	Unidad de medida culombios.
Energía ***(Energy)***		Integral ($\int I^2 dt$), W/R.	Unidad de medida A^2 o kJ/Ω.
Forma del impulso de la corriente del rayo ***(Stroke current impulse shape)***		Usada para determinar las características de la forma de onda, con énfasis en las características de la rata de ascenso de la corriente del rayo *(Lightning Current Rate of Rise)*.	Unidad de medida kA/μs

Fuente: Tomada de [3]

Como se mencionó previamente, la actividad de rayos caracterizada por los parámetros mencionados en la Tabla 2.1 se ve influenciada por factores geográficos y meteorológicos tales como orografía, vientos, superficie, subsuelo y cambios asociados con la actividad humana. De acuerdo con esto, la presencia en Colombia de los vientos alisios del noreste y del sureste, los cuales forman la zona de confluencia intertropical (ZCIT), se convierten en la principal fuente para la generación de rayos.

En cuanto a la orografía, en Colombia se tiene un gran sistema montañoso el cual interactúa con los vientos y produce una alta concentración de nubes de tormenta generando mayor actividad de rayos. Además, las propiedades físicas de la superficie del planeta, influenciada en los cambios por la actividad humana, también contribuyen al aumento de dicha actividad. Este factor es relevante cuando la población, el área y la temperatura media aumentan significativamente. Otro de los factores a tener en cuenta en la actividad de rayos es el subsuelo, el cual contiene agentes que pueden producir cargas iónicas (fuentes geomagnéticas o radiactivas) en el entorno.

2.2 Estudios sobre mortalidad por rayos en el mundo

Todos los seres humanos están expuestos a diferentes tipos de riesgo que se pueden llegar a presentar en el diario vivir, provocando la muerte o lesiones graves. Entre estos se encuentran los riesgos naturales, los cuales se clasifican en geológicos, meteorológicos-hidrológicos, geomorfológicos, climatológicos, biológicos y cósmicos. En este sentido, los rayos se encuentran dentro de los riesgos meteorológicos, al igual que otros fenómenos naturales como las tormentas eléctricas y las lluvias intensas, los cuales, en su mayoría, ocurren en las regiones tropicales del planeta.

Debido a esto, en los últimos años se han realizado investigaciones sobre lesiones y muertes a causa de fenómenos atmosféricos, mostrando que, después de las inundaciones, los rayos son la tercera causa de muerte y la segunda causa de lesiones en diversas regiones del mundo [13], [1]. Algunos estudios realizados a nivel internacional sobre muertes por rayos se resumen en [15], sintetizando los resultados obtenidos de la tasa de mortalidad por rayos (muertes por millón habitante-año), el número de muertes ocurridos al año y el período de análisis para el cual se tomó la información (años). En dichos trabajos, los autores tomaron la información de diferentes fuentes (Agencia Nacional Meteorológica, departamentos de estadística, registros médicos, recolección de datos personales, base de datos de peligros naturales, entre otros). No obstante, se debe mencionar que hay algunos países que no cuentan con una base de datos consolidada donde puedan consultarse las muertes ocasionadas por rayos.

Los 26 países que han realizado estudios sobre el tema encontraron que al año ocurren 4176 muertes a causa de rayos. En la Tabla 2.2 se muestra la información promedio de la tasa de mortalidad, muertes por rayos y el periodo de tiempo analizado para cada continente. Se puede observar que la tasa máxima de mortalidad se presenta en los países menos desarrollados (hasta 21 muertes por millón habitante-año), mientras en los países desarrollados (Europa y Australia) la tasa de mortalidad es inferior a 0.3 muertes por millón habitante-año. Aunque se requiere de una base de datos más organizada y sistematizada, los estudios consolidados en [15] estiman que al año ocurren entre 6000 y 24000 muertes a causa de rayos en el mundo.

Tabla 2.2 Resumen de muertes por rayos a Nivel mundial

Continente	Tasa de mortalidad [muertes/millón-año]	Muertes por año [Personas]	N°. de años [Años]
África	21.2	269	5
Asia	1.3	366	13
Australia	0.1	2	10
Europa	0.2	8.1	10
América del Norte	1.0	90	19
América del Sur	1.3	104	10

Fuente: Tomado de [15] y modificado por la autora

Además de la información presentada por continentes, diversos autores han desarrollado estudios de mortalidad en Asia, América y Europa. Es así como *Myagmar y Gomes* realizaron un estudio sobre las muertes causadas por rayos en Mongolia, encontrando una tasa de mortalidad de 15.4 muertes por millón habitante-año, siendo ésta una tasa de mortalidad muy alta en comparación con otros países que tienen el mismo valor de DDT [16]. La base de datos que se tomó para este estudio está comprendida para el periodo entre 2003 y 2015 donde se reportaron 57 muertes y 58 heridos.

En cuanto a las muertes reportadas en dicho trabajo se encontró que el 78% corresponden al género masculino, el 56% son jóvenes entre los 15 y 30 años, el 88% de las personas se encontraban en lugares abiertos y el 67 % de muertes por rayos ocurren en horas de la tarde entre las 12:00 horas y las 18:00 horas. Las mismas características se presentan con porcentajes altos para los heridos con una diferencia promedio del 11% respecto al caso de las muertes. Los autores concluyen que es necesario tener en cuenta muchos factores dependientes del país para promover la seguridad y protección contra rayos en una región determinada.

Por otra parte, el estudio presentado en [17] recolectó información de muertes y heridos por rayos en Malasia entre 2008 y 2017 a partir de diferentes fuentes de información (periódicos, blogs, noticias electrónicas, anécdotas, historias de radio, etc). Los autores también recolectaron información de rayos, la cual se tomó de la observación registrada continuamente por el *Lightning Imaging Sensor (LIS)* propiedad de la NASA. Con la información analizada, y basado en un estudio realizado en [18], este trabajo propone una fórmula que permite estimar el número anual de muertes por rayos en los distritos de Malasia. La fórmula usada tiene en cuenta parámetros tales como: área, densidad de rayos y factor demográfico de cada distrito.

Las personas que trabajan en labores al aire libre, como los agricultores, están más expuestas a ser impactadas por rayos. En este sentido, *Holle* realizó un estudio donde recolectó información de las víctimas por rayos dedicadas a la agricultura en los Estados Unidos desde 1993, encontrando un total de 969 víctimas fatales y 597 lesiones no fatales [19]. Asimismo, más del 41% de los eventos ocurrieron en los campos de arroz, siendo el género masculino el que se ve principalmente afectado con más del 50% de eventos. Por otra parte, en dicho trabajo se reportó una gran cantidad de eventos en los meses de mayo, junio y agosto, y parte de los eventos ocurren generalmente durante las horas de tarde, lo cual coincide con la jornada de trabajo que tienen la mayoría de los agricultores.

En [20], [21] y [22] los autores presentan un análisis del efecto de los sistemas de alerta de tormenta en la mitigación del riesgo por rayos. La metodología se basa en emitir una alarma cuando se detecta la

ocurrencia de una tormenta en lugares específicos como ciudades, aeropuertos, estadios, refinerías de petróleo, parques, etc., los cuales son lugares donde las personas están más expuestas a recibir impactos de rayos. Además, para emitir las alarmas se tienen en cuenta factores como el tiempo de exposición de la actividad y el nivel de protección que se tendría en el momento en que se presenten rayos.

La publicación [23] mostró los resultados de un estudio de mortalidad por rayos realizado en Brasil en el 2012 por el Grupo de Electricidad Atmosférica – ELAT. En este estudio se reporta que en América Latina los rayos ocasionaron en promedio la pérdida de 1.7 personas por cada millón de habitantes en los últimos años, indicador muy alto comparado con el 0.1 por millón de habitantes en los países desarrollados. En la Tabla 2.3 se observa que Brasil es quien lidera el mayor número de muertes por ser el país más poblado del continente y recibir en promedio 50 millones de rayos nube-tierra por año. Sin embargo, la mayor tasa de mortalidad la tienen Cuba (5,9) y Panamá (4,9) ocupando el primer y segundo lugar, respectivamente. En cuanto a Colombia, se observa que ocupa los primeros puestos en el estudio realizado con una tasa de 1,6 muertes por millón habitantes-año (cuarta más alta) y un promedio anual de 74 muertos (segunda más elevada).

Tabla 2.3 Resumen de muertes por rayos en el Sur y Centro América

a) Tasa de mortalidad

País	Tasa de mortalidad [muertes/millón-año]
Cuba	5,9
Panamá	4,9
Perú	2,3
Colombia	1,6
Uruguay	1,5
Paraguay	0,9
Bolivia	0,7
Brasil	0,7
Venezuela	0,5
Argentina	0,4
Ecuador	0,3

b) Número de muertes por año

País	Número de muertes por año
Brasil	130
Colombia	74
Perú	68
Cuba	65
Panamá	17
Argentina	13
Venezuela	13
Bolivia	7
Paraguay	6
Uruguay	5
Ecuador	5

Fuente: Tomado de [23]

La tasa de mortalidad en Colombia entre el 2000 y 2009 según *Navarrete et al.* fue de 1.8 muertes por millón habitante año [24], periodo en el cual el Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas – DANE registró 757 muertes por rayos. Entre tanto, en el año 2015 el trabajo presentado por *Cruz* actualizó la información de muertes por rayos en Colombia hasta el 2012 encontrando una tasa de mortalidad de 2.0 muertes por millón habitante-año [25]. La diferencia entre ambos estudios se debe a que en el último estudio se tuvieron en cuenta las personas que fallecieron por factores indirectos ocasionados por rayos como es el caso de incendios o la caída de objetos.

En [26] se presentan los accidentes ocasionados por rayos durante 8 años (2003 - 2012) y reportados por el Ejército Nacional de Colombia con un total de 282 muertes por rayos. El 74% fueron heridos y el 26% restante fueron muertes. Según la Dirección de Preservación de la Integridad y Seguridad del Ejército – DIPSE, los accidentes ocurrieron en las temporadas de lluvias abril-junio y septiembre-noviembre. Una

explicación que dan los autores ante la ocurrencia de estos accidentes se debe al alto riesgo al que están expuestos los soldados al desarrollar su actividad de patrullaje en campos abiertos.

Finalmente, en búsqueda de metodologías que prevengan los accidentes y daños causados por rayos, los autores en [27] demuestran que uno de los principales obstáculos para evaluar las causas y consecuencias de este tipo de accidentes es la falta de información sobre el tema. De esta manera, mencionan que, con la existencia de normas y políticas públicas, sería posible desarrollar e implementar programas para la educación y prevención del riesgo por rayos en Colombia.

A partir de lo mencionado anteriormente, se concluye que los estudios por rayos realizados a nivel nacional e internacional no son altamente confiables y tampoco pueden ser comparables debido a que se usan diferentes metodologías y los años bajo estudio son diferentes.

2.3 Riesgo

Con el propósito de desarrollar una aproximación sobre el concepto de riesgo, se debe aclarar la definición que se empleará a lo largo de este trabajo. De acuerdo con una revisión de la literatura, se pueden encontrar diferentes definiciones de riesgo, tales como [28]–[31]: (a) "probabilidad de que ocurra un desastre"; (b) "probabilidad de que ocurra algún hecho indeseable"; (c) "probabilidad de que una amenaza se convierta en un desastre"; (d) "probabilidad de que ocurra un suceso y este afecte de manera negativa a una o más personas"; (e) "probabilidad de que se produzcan víctimas mortales, heridos o daños a la salud o a bienes como consecuencia de un peligro"; (f) "posibilidad de que un territorio y la sociedad que lo habita pueda verse afectado por un fenómeno de rango extraordinario"; (g) "capacidad de daño (personal y material) de un fenómeno en relación al tiempo"; y (h) "amenaza que yace sobre el ser humano en algún momento o una situación que genera incertidumbre".

Las definiciones presentadas anteriormente apuntan a la probabilidad de que un individuo o una sociedad estén expuestos a la ocurrencia de un suceso y se convierta en un desastre. Según la Organización de las Naciones Unidas (ONU) el riesgo se define como el producto de la probabilidad de ocurrencia de un desastre (peligrosidad), la vulnerabilidad en tanto por uno y la exposición (número de víctimas). Siendo así, en el presente trabajo se entenderá como riesgo *"La probabilidad de que ocurra un evento ocasionando pérdidas o lesiones en seres humanos los cuales dependen de factores como la peligrosidad, vulnerabilidad y exposición".* Se dice entonces que el riesgo es mayor cuando hay más daño, más gente implicada y cuando tiene menos tiempo en aparecer.

Se conocen diferentes tipos de riesgo, los cuales hacen referencia a un elemento, fenómeno, acción humana, rasgo, característica o exposición de un individuo y en donde se aumenta la probabilidad de provocar un daño o sufrir una enfermedad o lesión. A continuación, se describen los tipos de riesgo que pueden afectar negativamente a un individuo (riesgo individual) o más individuos (riesgo social), los cuales se pueden medir cualitativa o cuantitativamente.

- *Ambiental:* Es causa de algún fenómeno natural (riesgo natural) o de alguna acción humana (riesgo antrópico) y por tanto no se pueden controlar. Se pueden tener medidas de prevención y protección.
- *Biológico:* Se genera a partir de organismos microscópicos tales como las infecciones agudas o crónicas (bacterias, virus u hongos), la parasitosis y las reacciones tóxicas y alérgicas (plantas y animales) y los organismos macroscópicos tales como ácaros, piojos, gatos, perros y cualquier ser vivo que se pueda ver a simple vista.

- *Económico:* Es cuando una empresa se ve afectada económicamente. Este riesgo puede presentar y generar cambios en empresas, productos o servicios.
- *Ergonómico:* El riesgo ergonómico es causa de diferentes condiciones laborales tales como: monotonía, fatiga, sobre carga física y mental, entre otras, a las cuales están expuestos los trabajadores incrementando así, la probabilidad de que se produzca un daño.
- *Financiero:* Es cuando una persona o empresa no puede hacer frente al pago de deudas.
- *Físico:* El riesgo físico es causa de las propiedades físicas (carga física, ruido, iluminación, radiación ionizante, radiación no ionizante, vibración y temperaturas extremas) que actúan sobre los tejidos y órganos del cuerpo.
- *Mecánico:* Este riesgo se presenta cuando un individuo presenta una lesión por la acción mecánica de elementos (herramientas, máquinas, materiales proyectados, sólidos o fluidos).
- *Psicosocial:* Se relaciona con las situaciones o condiciones del trabajo que afectan de manera negativa la salud física y mental del trabajador.
- *Químico:* Es cuando algunas sustancias químicas por su estado físico (líquidos, vapores, sólidos, polvos, humos y gases), por su origen (orgánicos e inorgánicos) y por sus efectos en la salud (corrosivos, irritantes, asfixiantes, cancerígenos, etc) producen efectos nocivos a las personas expuestas.

De acuerdo con los tipos de riesgo, en este trabajo se hablará especialmente del *riesgo ambiental* en el cual se encuentra el *riesgo natural*. Dentro del *riesgo natural* se asocian fenómenos naturales como los geológicos, meteorológicos e hidrológicos, geomorfológicos, climatológicos, biológicos y cósmicos, los cuales provocan desastres naturales en diferentes regiones del mundo ocasionando daños materiales y la muerte de miles de personas. Según [28] dentro del *riesgo natural* existen enfoques naturales, sociales y territoriales los cuales se muestran en la Tabla 2.4. Cabe mencionar que los conceptos de catástrofe y desastre se involucran dentro del riesgo en el momento que este se supera, es decir, que el riesgo es una posibilidad, mientras que la catástrofe supone una fatalidad convirtiéndose en una realidad.

Tabla 2.4 Enfoques del riesgo natural

	Naturaleza	**Social**	**Territorial**
Riesgo	Umbral de la dinámica natural rebasado por el hombre en el desarrollo de sus actividades.	Grado de aceptación de la peligrosidad natural por un grupo humano.	Plasmación territorial de una actuación humana poco acorde con los rasgos extremos del medio donde tiene lugar
Catástrofe	Efectos en una sociedad de un episodio natural de rango extraordinario.		
Desastre	Grado superior de una catástrofe que obliga a la puesta en marcha de ayuda externa al territorio afectado.		

Fuente: Tomado de [28]

El nivel de riesgo se puede determinar usando métodos cualitativos, semi-cuantitativos o cuantitativos. El *método cualitativo* es uno de los más utilizados ya que permite tomar decisiones dado que es una técnica que se refiere a las cualidades. Por lo tanto, es un método que describe de forma minuciosa los hechos, eventos, situaciones, comportamientos e interacciones mediante un estudio o a partir de las experiencias. Para usar palabras como alto, medio o bajo se usa el método *semi-cuantitativo* el cual demuestra una relación con una escala apropiada. En cambio, el método *cuantitativo* permite asignar

valores de ocurrencia a los tipos de riesgo identificados. De esta forma, el método cuantitativo puede usar análisis de consecuencias, análisis de probabilidad, simulación computacional y método Montecarlo.

Por otra parte, el análisis de riesgo es una disciplina científico-técnica que busca identificar y determinar cuáles son los factores de riesgo natural, tecnológico, ecológico o social que pueden tener un mayor efecto dentro de un estudio específico. En este proceso, inicialmente, se identifica el peligro con el fin de estimar el riesgo donde se valoran la probabilidad y las consecuencias del peligro. Siendo así, el análisis tiene en cuenta tres etapas: (i) identificación y análisis de factores de riesgo; (ii) evaluación del riesgo; y por último (iii) análisis y diseño de medidas para la mitigación del riesgo [28]. A continuación, se describen brevemente estas etapas.

La primera etapa del análisis del riesgo se basa en **identificar los factores de riesgo** que son todos aquellos elementos que condicionan o influyen en la intensidad de los efectos, en el alcance del daño o en la ocurrencia del riesgo. De acuerdo con [28], para que exista un daño esperable, se deben dar necesariamente todos los factores de riesgo que se muestran en la Figura 2.2 los cuales se clasificaron como factores Nivel I y factores Nivel II.

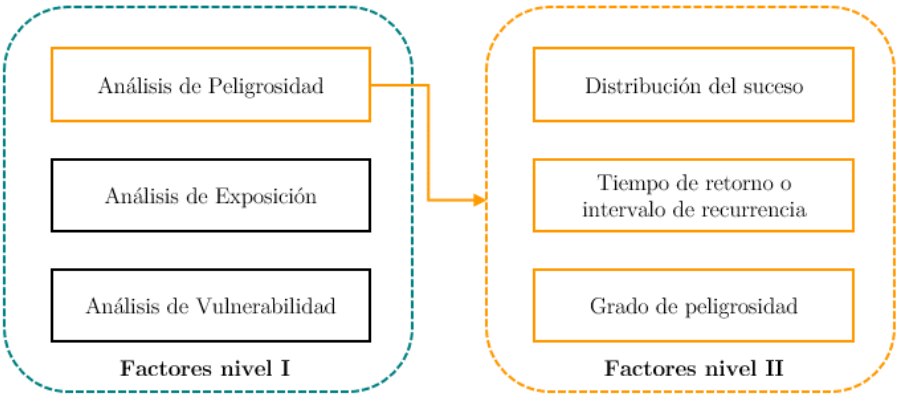


Figura 2.2 Niveles de los factores de riesgo
Fuente: Autora

De acuerdo con la Figura 2.2, el *análisis de peligrosidad* se clasificó como un factor Nivel I siendo aquel que determina la probabilidad de ocurrencia de un evento potencialmente peligroso durante un periodo de tiempo en un área (lugar o zona) determinada. Dentro de este factor se encuentran tres factores: distribución del suceso, tiempo de retorno o intervalo de recurrencia y grado de peligrosidad los cuales fueron catalogados como factores de Nivel II. Los otros factores del Nivel I se refieren al *análisis de exposición* y al *análisis de la vulnerabilidad*. En este contexto, la exposición se refiere a la población, actividades económicas, infraestructura (edificios y obras civiles) y servicios públicos que se encuentren expuestos al peligro, mientras que la vulnerabilidad es el grado de pérdida de uno o varios elementos bajo riesgo los cuales resultan de la probabilidad de ocurrencia de un evento desastroso.

La segunda etapa es la **evaluación del riesgo**, la cual permite detectar todos los riesgos existentes en diferentes áreas de la vida cotidiana. Esta evaluación tiene como principal objetivo controlar y minimizar los riesgos estableciendo las medidas pertinentes para los diferentes tipos de riesgos. Por lo tanto, es una de las fases más importantes ya que se calculan o estiman las pérdidas esperables, las cuales se busca que sean cero. Sin embargo, factores como cultura, tiempo, dinero, entre otros hacen que la probabilidad

de obtener un riesgo cero sea baja. Por estas razones, a nivel mundial existen criterios de admisibilidad o niveles de riesgo que permiten tomar decisiones.

Los criterios de admisibilidad hacen referencia a dos límites o regiones (aceptable e inaceptable), en la región aceptable se encuentran todos aquellos riesgos con los cuales una sociedad puede interactuar a diario y estos se pueden controlar. En la región inaceptable se encuentran los riesgos con los que la sociedad interactúa sin recibir ningún beneficio y sólo pueden ser justificados en situaciones extraordinarias. Por otra parte, la región que se encuentra en medio de los criterios de admisibilidad se conoce como zona de riesgo tolerable o región ALARP según sus siglas en inglés *"As Low As is Reasonably Practicable"* que en español significa *tan bajo como sea razonablemente práctico* [32]. El término ALARP se origina de la legislación británica [33] y se usa con mayor frecuencia para el tema de seguridad laboral. Tanto el Reino Unido y los Países Bajos se encuentran en la vanguardia de la aplicación y utilización del análisis cuantitativo de riesgos y los criterios de riesgo.

Según [34], el riesgo tolerable es aquel con el cual la sociedad está dispuesta a vivir con el fin de asegurar ciertos beneficios, pero con la seguridad de que están siendo controlados adecuadamente. El riesgo tolerable está sujeto a una revisión permanente y se reduce, siempre y cuando sea posible, con los medios que estén al alcance de la sociedad. Las medidas de reducción en el riesgo tolerable se deben evaluar e implementar con base en un análisis costo-beneficio. En la Figura 2.3 se presenta el principio ALARP en el cual se encuentran las tres regiones descritas anteriormente (aceptable, tolerable e inaceptable) y las cuales representan el método cualitativo para analizar el riesgo. El ancho del triángulo representa la cantidad de atención y los recursos que se requieren para analizar un riesgo en particular.

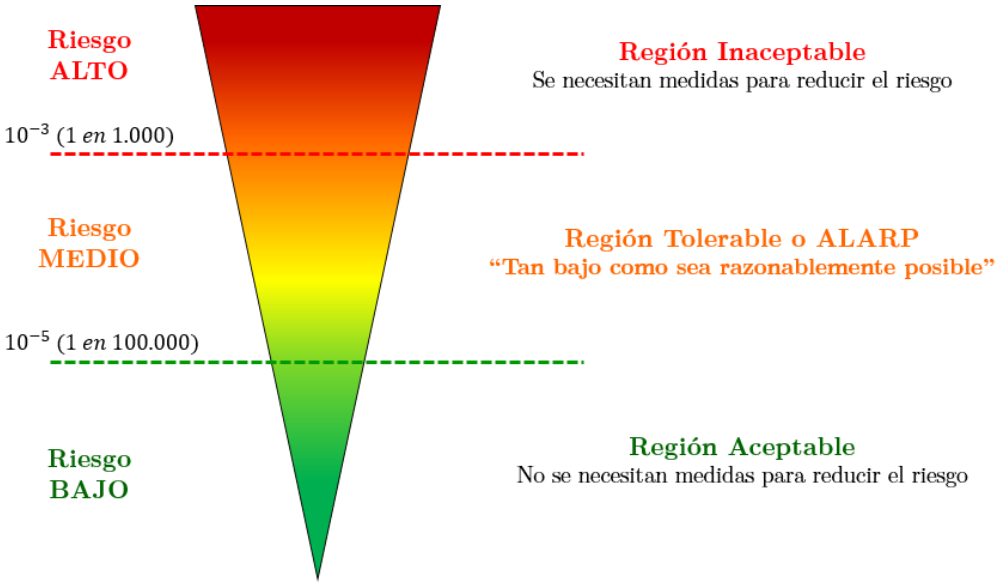


Figura 2.3 Principio ALARP
Fuente: Tomado de [32] **y adaptado por la autora**

Una forma de analizar el riesgo cuantitativamente es por medio de la curva F-N donde F es la frecuencia acumulada anual y N es el número de víctimas. Un ejemplo de estas curvas se muestra en la Figura 2.4. Las curvas F-N representan la relación existente entre la probabilidad de ocurrencia de un evento y el número de víctimas en un área determinada de estudio. Por lo tanto, estas curvas se usan principalmente para analizar el riesgo social. Una de las ventajas que tienen las curvas F-N es que se puede observar si

con pocos accidentes hay muchas víctimas o sí al ocurrir muchos accidentes hay pocas víctimas [35]. Además, permiten tener una comparación sólida entre diferentes tipos de riesgos y visualmente se determina el nivel de riesgo al que se está expuesto.

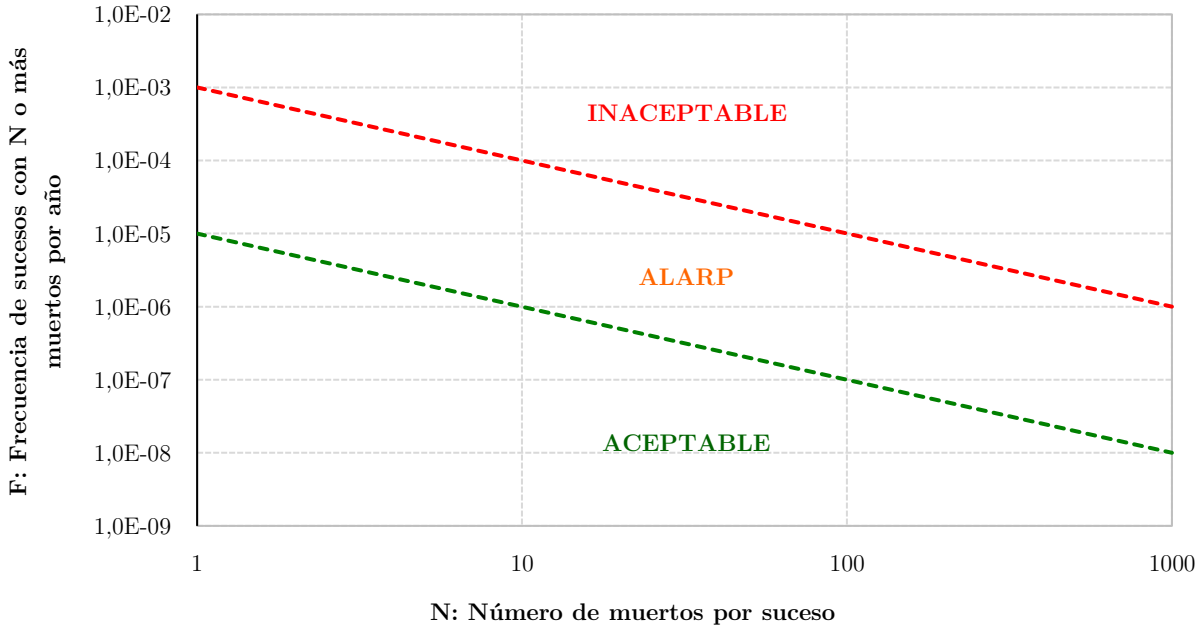


Figura 2.4 Curva F-N
Fuente: Autora

De acuerdo con [36] países como el Reino Unido, Hong Kong, Países Bajos y Australia se encuentran en la vanguardia de aplicar y utilizar un análisis de riesgo. A continuación, se presentan los límites inferiores y superiores en los cuales se debe presentar el área ALARP para dichos países.

- Límite inferior ALARP para un trabajador en el Reino Unido: 1 x 10^{-5}
- Límite inferior ALARP para público en el Reino Unido: 1 x 10^{-6}
- Límite inferior ALARP para público en Países Bajos: 1 x 10^{-8}
- Límite superior ALARP para un trabajador en el Reino Unido: 1 x 10^{-3}
- Límite superior ALARP para público en el Reino Unido: 1 x 10^{-5}
- Límite superior ALARP para público en Hong Kong: 1 x 10^{-5}
- Límite superior ALARP para público en Países Bajos y Nueva Gales del Sur (Australia): 1 x 10^{-6}

Los autores de [37] y [38] presentan el riesgo tolerable para diferentes actividades, tales como: tipo de accidente, actividad asociada como la muerte, sector industrial, grupo de población y causa de muerte. Adicionalmente, en la Tabla 2.5 se evidencian algunos valores de riesgo tolerable, y dentro de los cuales se menciona que el riesgo tolerable al ser impactado por un rayo es de 1 en 2.000.000.

ESPACIO DEJADO EN BLANCO DE MANERA INTENCIONAL

Tabla 2.5 Comparación de probabilidad de muertes para un individuo por año de exposición

Riesgo		Actividad
1 en 400	(25×10^{-3})	Fumar (10 cigarrillos por día)
1 en 2.000	(5×10^{-4})	Todos los accidentes
1 en 8.000	(1.3×10^{-4})	Accidentes de tráfico
1 en 20.000	(5×10^{-5})	Leucemia por causas naturales
1 en 30.000	(3.3×10^{-5})	Trabajo en la industria, ahogamiento
1 en 100.000	(1×10^{-5})	Envenenamiento
1 en 500.000	(2×10^{-6})	Desastres naturales
1 en 1.000.000	(1×10^{-6})	Escalada en roca* Conducir a 50 millas por carretera*
1 en 2.000.000	(5×10^{-7})	Ser impactado por un rayo*

Nota: La fuente de la tabla es la *Royal Commission on Environmental Pollution*, Chairman Sir Brian Flowers, Sixth Report, Nuclear Power and the Environment (Cmd 6618)

*Estos riesgos se expresan convencionalmente en esta forma y no en términos de exposición durante un año

Fuente: Tomado de [39] **- Tabla 7: Comparative probability of death for an individual per year of exposure (order of magnitude only)**

Generalmente, el riesgo tolerable se mide de acuerdo con el tipo de actividad, por ejemplo, el riesgo de viajar en avión, automóvil o tren se puede medir como una proporción del número de kilómetros o el número de viajes recorridos. Sin embargo, el riesgo se asocia con pérdidas las cuales pueden ser materiales, humanas o económicas. Por lo tanto, el riesgo también se puede medir en pérdidas de vidas por año y varían dependiendo de actividades a las cuales se hayan expuesto.

Finalmente, en la última etapa del análisis de riesgo se encuentra el **análisis y diseño de medidas de mitigación**, la cual consiste en establecer medidas para la protección del riesgo. De esta manera, se tiene en cuenta y se aborda el concepto holístico definido como 3P que consiste en Predecir, Prevenir y Proteger. A continuación, se describe cada una de las tecnologías.

- La *medida predictiva* tiene como finalidad anticipar dónde, cuándo y con qué intensidad ocurrirá un determinado evento. Este tipo de medida requiere de herramientas tecnológicas que tengan la capacidad de detectar patrones para analizar y conocer la probabilidad de ocurrencia de un evento. Para realizar un análisis predictivo se requiere tener una gran cantidad de datos (históricos) con los cuales se obtengan tendencias de comportamiento. Esto, con el fin de aplicarse sobre cualquier tipo de evento que haya ocurrido o vaya a ocurrir, es decir, que las medidas predictivas permiten hacer análisis del pasado, presente y futuro.
- La *medida preventiva* busca disminuir o evitar los daños derivados de los diferentes riesgos. Se clasifican en medidas de planificación, estructurales y no-estructurales. Las medidas de planificación tienen como objetivo prever el riesgo y estar preparados ante la posibilidad de que ocurra un evento; las medidas estructurales se orientan a disminuir la vulnerabilidad de las edificaciones; y en las medidas no-estructurales se elaboran mapas de riesgo.
- La *medida de protección* tiene como objetivo implementar elementos, normas, señales eficaces, entre otras, que mitiguen el riesgo para proteger la vida humana y los bienes materiales que se encuentren expuestos a cualquier tipo de riesgo.

3 Mortalidad a causa de rayos en Colombia

3.1 Geografía de Colombia

Colombia tiene una ubicación latitudinal que corresponde a 17° norte y 4° de latitud sur. Es el principal país en Sudamérica que cuenta con dos océanos: el Océano Pacífico y el Océano Atlántico, lo cual corresponde a 2.900 km de costa. Tiene un área de 1.141.748 km2, y según el censo realizado en el 2018, la población llegará a 45.5 millones de habitantes, aproximadamente. El territorio colombiano se divide topográficamente en dos regiones predominantes: la región montañosa conformada por la cordillera de los Andes que conecta con Colombia por el departamento de Nariño y la región de los Llanos Orientales conformada por la Orinoquía y la Amazonía. La cordillera de los Andes se subdivide en tres cordilleras; Occidental, Central y Oriental las cuales definen las características topográficas del país como se describen en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Topografía de Colombia

Variables	**Cordillera Occidental**	**Cordillera Central**	**Cordillera Oriental**
Orientación	Sur – Norte	Sur – Norte	Suroeste – Noreste
Elevación [m]	4.764	5.364	5.775
Anchura [km]	376	449	517
Longitud [km]	1200	1.023	1.200
Extensión [km]	1.095	900	1.300
Superficie [km²]	86.239	129.737	144.252
Cumbre	Cerro Tamaná 4.200 m.s.n.m	Nevado del Huila 5.365 m.s.n.m	Ritacuba Blanco 5.410 m.s.n.m
Departamentos	Antioquia, Chocó, Nariño, Valle del Cauca, Córdoba, Cauca, Risaralda y Caldas.	Antioquia, Tolima, Bolívar, Cauca, Nariño, Huila, Valle del Cauca, Caldas, Putumayo, Quindío y Risaralda.	Cundinamarca, Boyacá, Santander, Norte de Santander, Huila, Tolima, Cesar, La Guajira, Caquetá, Meta, Casanare y Arauca.

Fuente: Autora

Colombia al encontrarse ubicada en latitudes bajas posee clima tropical siendo este habitual en la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). Las variaciones climáticas de Colombia se ven afectadas por el sistema montañoso, el cual es acompañado por los vientos alisios y otros de carácter local. Por tal razón, en el territorio colombiano existen diferentes tipos de pisos térmicos (cálido, templado, frío, páramo y nevado o glacial) los cuales se presentan en la Figura 3.1. En los terrenos bajos, medios y altos de Colombia se tienen tipos de piso semiárido, semihúmedo y húmedo, respectivamente. Por otra parte, la distribución de lluvias a lo largo del año está determinada por épocas secas y cálidas en las partes bajas y épocas húmedas y lluviosas en las partes altas del

territorio colombiano. En la época de lluvias se presentan dos temporadas abril-mayo y octubre-noviembre, mientras los otros meses se conocen como épocas secas.

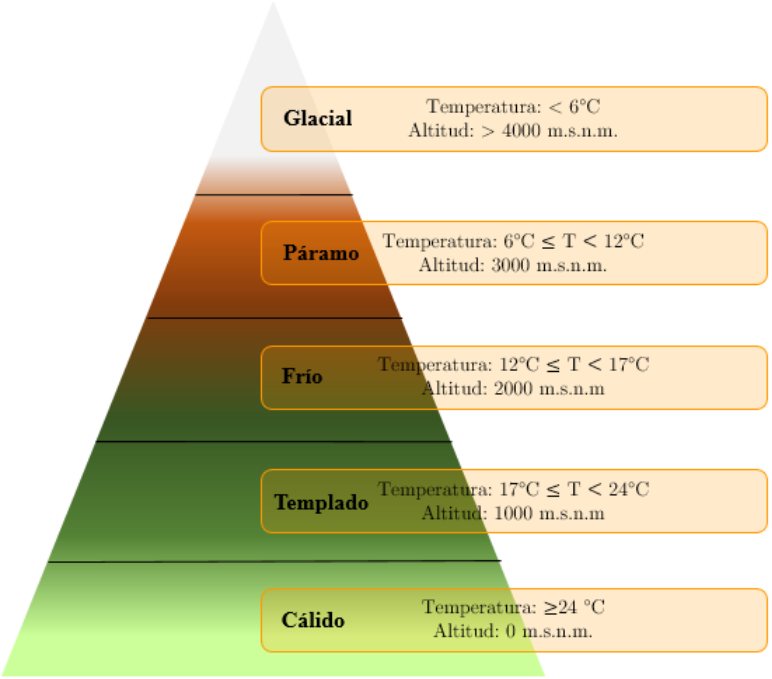


Figura 3.1 Tipos de pisos térmicos en Colombia
Fuente: Autora

Colombia está dividida territorialmente en 32 departamentos y 1.122 municipios, los cuales se agrupan en seis regiones naturales: Amazonía, Andina, Caribe, Insular, Orinoquía y Pacífico. Estas regiones tienen además otras subregiones que se clasifican según la vegetación, los relieves, el clima, la población, la economía y las clases de suelos, entre otros conforme con el mapa del Instituto Geográfico Agustín Codazzi[1] (IGAC).

De acuerdo con los factores mencionados anteriormente y los objetivos de este trabajo, se tuvo en cuenta la metodología usada en [40] con el fin de identificar las subregiones a estudiar. La metodología se basa en un análisis de clúster o análisis de conglomerados y consiste en agrupar elementos o factores (climatológicos y fisiográficos) intentando encontrar la máxima homogeneidad en cada grupo y la mayor diferencia entre estos. A continuación, se describirán cada una de las regiones del país y su subdivisión teniendo en cuenta sus factores climáticos y fisiográficos.

La región andina abarca un territorio extenso con una superficie aproximada de 300.000 km^2 representando el 12 % del territorio colombiano y siendo esta una de las regiones más pobladas. La región es heterogénea debido a la variación de altura, las condiciones climáticas (frío, cálido, cálido-semihúmedo, húmedo y semiárido) y por el paso de la Cordillera Central, el Valle del Río Magdalena, la Cordillera Oriental y algunos terrenos bajos del territorio colombiano. Debido a esto, la región se subdividió en 10 subregiones: Altiplano Cundiboyacense, Alto Magdalena, Altiplano Popayán,

[1] http://www2.igac.gov.co/ninos/UserFiles/Image/Mapas/regiones%20naturales.pdf

Catatumbo, Montaña Centro, Montaña Sur, Montaña Noreste, Montaña Noroeste, Valle del Cauca y Valle del Magdalena Medio.

La región Pacífica se subdividió en 3 subregiones: Serranía del Baudó, Pacífico, y Llanuras Costeras del Pacífico, las cuales suman una superficie total de 83.170 km^2, lo cual representa el 7 % del territorio nacional. En esta región se presentan temperaturas aproximadamente de 24°C todo el año y lluvias permanentes, catalogando el clima de la región pacífica como tropical-húmedo de selva. La región Caribe se caracteriza por tener una gran variedad de climas en donde se pueden encontrar todos los pisos térmicos con una altitud media de 300 m y posee una superficie de 132.228 km^2, representando aproximadamente el 12 % del territorio nacional. Las subregiones que conformarán la región Caribe son: Llanura Guajira, Sierra Nevada y Llanura Caribe.

Por otra parte, el 18 % del territorio nacional se encuentra dentro de la región de la Orinoquía la cual tiene una superficie total de 285.437 km^2. Por esta razón, la región se subdividió en 2 subregiones: Piedemonte Llanero y Orinoquía. Finalmente, en el sur del país, con una altitud máxima de 200 msnm, se encuentra la región Amazónica, la cual comprende el 41 % del territorio nacional con una superficie total de 483.119 km^2. Las subregiones que conformarán la región amazónica son: Piedemonte Amazónico y Amazonía. En la Figura 3.2 se muestran las 20 subregiones establecidas. Cabe señalar que las siglas de las subregiones naturales se usarán a lo largo del documento.

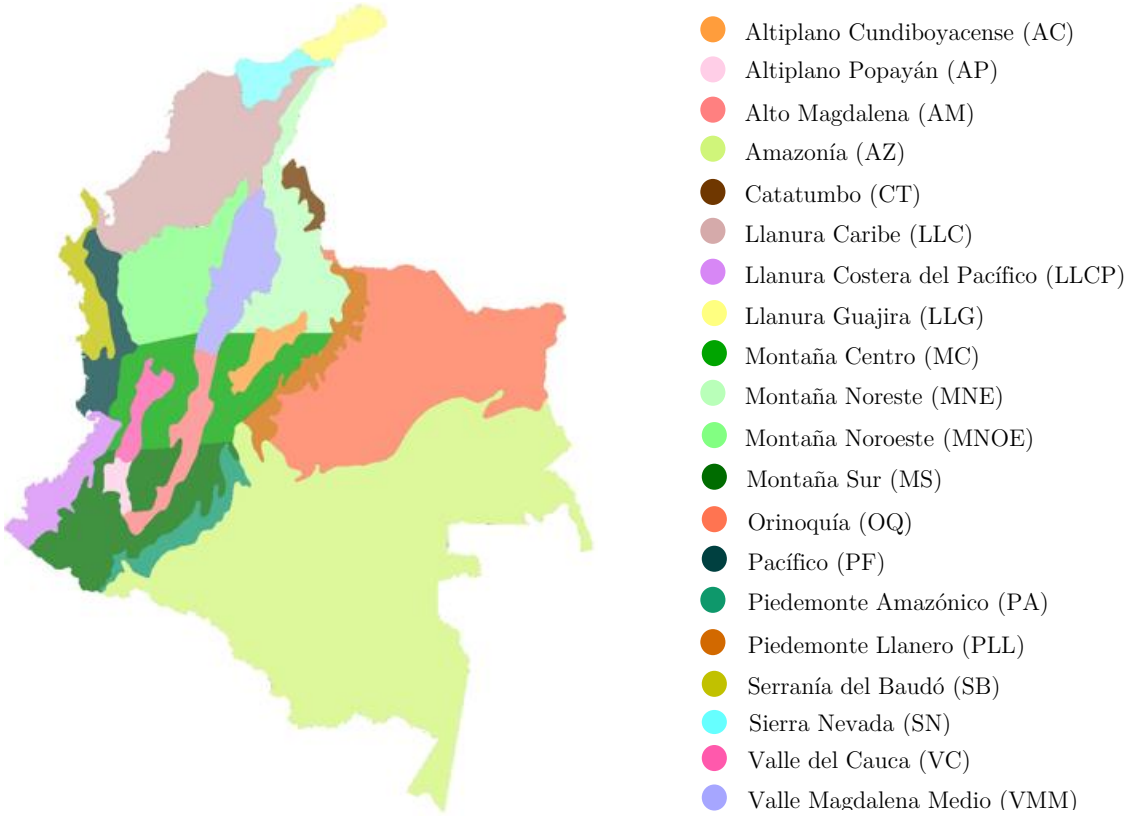


Figura 3.2 Subdivisión de regiones naturales para Colombia
Fuente: Tomado de [40]

3.2 Recopilación de Datos

Una de las principales actividades que se propuso durante la investigación fue recolectar las estadísticas de muertes y heridos por rayos. Sin embargo, durante el proceso de recolección de información se encontró poca información confiable sobre heridos, por lo cual, se decidió trabajar solo con las estadísticas de muertes por rayos. Para estas estadísticas se tuvo en cuenta la información del Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE) y los medios de comunicación (noticieros, noticias en periódicos impresos y virtuales).

El DANE es una entidad gubernamental que recoge la información en físico o en digital sobre nacimientos, defunciones fetales y no fetales que son diligenciados por los médicos, permitiendo así contar con información que revela los cambios ocurridos en los niveles y patrones de mortalidad y fecundidad en Colombia. Para su consulta, el DANE tiene a disposición un portal web[2] abierto al público el cual permite tener acceso a la información de Estadísticas Vitales donde se muestran los nacimientos desde 1998 hasta el 2016 y las defunciones registradas desde el año 1979 hasta el 2016.

Cuando se selecciona alguno de los años se abre una ventana que permite procesar la información de defunciones no fetales por medio de tres opciones: tabulados, cruce de variables y lista de variables. Para este trabajo, la información se procesó con la opción "Cruce de Variables" debido a que la opción de "Tabulados" presenta la frecuencia de los datos y la opción "Lista de Variables" muestra el conteo de los datos. En cambio, la opción "Cruce de Variables" permite realizar una consulta por separado de diferentes parámetros.

En la Figura 3.3 se muestra la forma en que se pueden consultar variables como departamento, municipio, sexo, edad, área, sitio, hora y causa de defunción. Cabe aclarar que la variable causa básica de muerte o defunción se define según la CIE (Clasificación Estadística Internacional de Enfermedades y Problemas relacionados con la salud) como *"enfermedad o lesión que desencadenó la sucesión de eventos patológicos que condujeron directamente a la muerte o las circunstancias del accidente o acto de violencia que produjeron la lesión mortal"*. Adicionalmente, en la CIE-10 (décima versión) se encuentra la causa de víctima de rayo correspondiente al código X33.

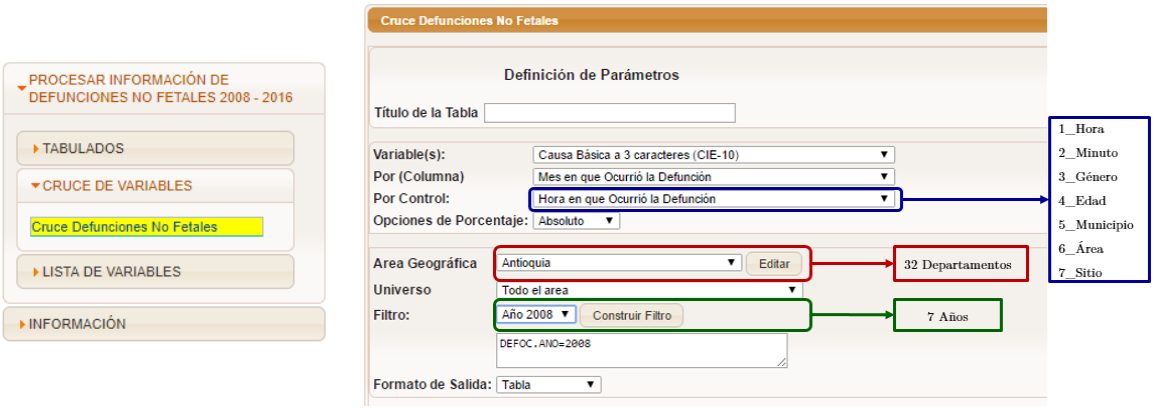


Figura 3.3 Plataforma del DANE para obtener la información de defunciones ocurridas en el país
Fuente: http://systema74.dane.gov.co/bincol/RpWebEngine.exe/Portal?BASE=DEFOC08&lang=esp

[2] Portal web www.dane.gov.co / Estadísticas por tema / Demografía y población / Nacimientos y defunciones / Sistema de consulta.

Las variables mencionadas anteriormente se descargaron por separado para cada departamento y cada uno de los años comprendidos en el periodo 2008-2016, mientras que las estadísticas desde 1979 hasta el 2007 se obtuvieron por medio de una carta radicada en el DANE. Luego de obtener una amplia base de datos, se procedió a filtrar la información de cada uno de los años de acuerdo con la causa X33-víctima de rayo, obteniendo así estadísticas de muertos por rayos desde 1997 hasta 2016.

Las estadísticas de muertes por rayos para los años comprendidos entre 1979 y 1996 no se pudieron filtrar debido a que el DANE utilizaba la clasificación CIE-9 (novena edición), la cual tenía una codificación diferente y no se podía identificar con claridad los casos asociados a muerte por rayos. Así pues, en la CIE-9 las muertes relacionadas con la parte eléctrica se encuentran como "accidente causado por la corriente eléctrica", "accidente causado por la corriente eléctrica – instalaciones y aparatos domésticos", "otro accidente causado por la corriente eléctrica", "otro accidente causado por la corriente eléctrica sin especificación".

Parte de la información también se recolectó a través de los medios de comunicación con el propósito de relacionarla con el DANE. Sin embargo, al relacionar los casos de los años anteriores reportados en los medios de comunicación con los del DANE se evidenció que los medios de comunicación sólo dan a conocer los casos que se reportan en las zonas rurales de mayor importancia. También se hizo una búsqueda en medios físicos, en repositorios generales de la Hemeroteca Nacional y la Biblioteca Luís Ángel Arango. No obstante, no fue posible realizar una consolidación de información dado el volumen y la complejidad de la extracción de la información.

Finalmente, y a pesar de algunas limitaciones con la información disponible, se logró consolidar en una tabla (se mencionará en el documento como "*Base de Datos*") las estadísticas de muertes por rayos para el periodo comprendido entre 1997 hasta 2016. Adicionalmente, se tienen estadísticas del año 2017 obtenidas a partir del seguimiento que se ha hecho desde julio de 2016 con las noticias que suministran los medios de comunicación. La razón por la cual no se tomó el año 2017 del DANE es porque esta entidad da a conocer las estadísticas cada 18 meses, de manera que la información de muertes por rayos correspondientes a 2017 será suministrada solo hasta el segundo semestre de 2019. De acuerdo con lo expuesto anteriormente, para este trabajo se completó una ventana de tiempo de 21 años.

3.3 Mortalidad

Con base en la información recopilada de muertos por rayos (registro de defunciones del DANE), en esta sección se estimará y analizará la mortalidad causada por este fenómeno. Este término se ha incluido en este trabajo ya que expresa el número de defunciones por lugar, periodo de tiempo y causa de muerte en relación con el total de la población. De este modo, con las estadísticas recolectadas para el periodo comprendido entre 1997 y 2017 se registraron un total de 1313 muertes por rayos. Estas estadísticas dan a conocer que a nivel nacional fallecen en promedio 63 personas al año, es decir, que al mes fallecen aproximadamente 5 personas. Este resultado está por encima del promedio reportado en los estudios que se han realizado a nivel mundial (ver sección 2.2).

En la Figura 3.4 se evidencia la mortalidad a causa de rayos para cada uno de los años bajo estudio. Los años que presentaron un número de muertes por encima del valor promedio anual fueron 1999, 2001, 2003 - 2006, 2008, 2009, 2012 y 2014. Los eventos que se presentaron durante estos años se atribuyen a

los fenómenos climáticos[3] de la niña "época de lluvias" (color azul) y del niño "época de calor" (color rojo). El fenómeno de la niña se caracteriza por presentar temperaturas frías y perdurables, las cuales pueden ocurrir en el transcurso del año o solo en ciertos meses. En cambio, el fenómeno del niño se relaciona con el calentamiento de las aguas del pacífico, provocando así una temporada seca a nivel nacional.

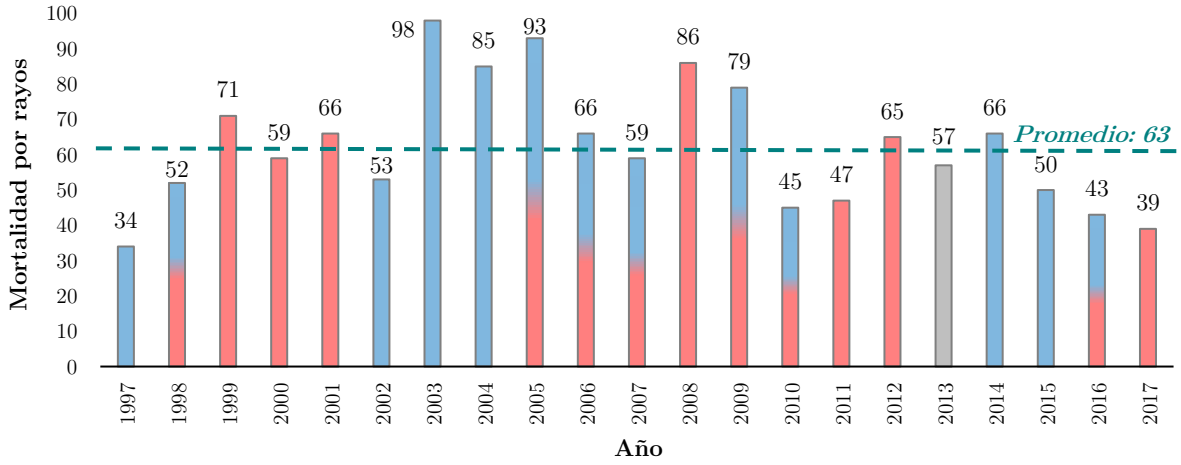


Figura 3.4 Mortalidad anual a causa de rayos en Colombia para el período 1997-2017
Fuente: Autora

Con la información obtenida no sólo se realizó el análisis de mortalidad, también se desagregó la información suministrada por la fuente, es decir, que se analizaron características tales como departamento, municipio, mes, edad, área, sitio, sexo, entre otras. Dicho lo anterior, se encontró que 535 casos reportados afectaron personas entre los 15 y 29 años. El 72% del total de los casos se presentaron en el área rural y el 23% en el área urbana de los cuales el 32% se reportó en cercanías de la casa de la víctima. Por otra parte, el género masculino es el principal afectado con un 82%, respecto al 18% que se presenta en el género femenino.

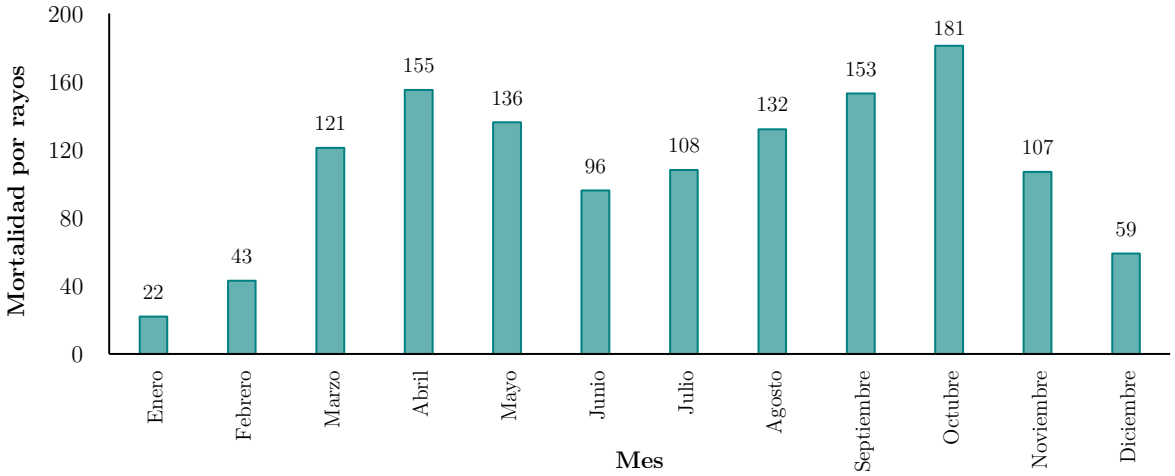


Figura 3.5 Mortalidad mensual a causa de rayos en Colombia para el periodo 1997-2017
Fuente: Autora

[3] La información sobre el comportamiento del fenómeno de niño y niña fue tomado de: http://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php

El comportamiento mensual de la mortalidad por rayos se relaciona con las temporadas de lluvias que se presentan en el país. De esta manera, en la Figura 3.5 se observa que el 12% y el 14% de los casos se registraron en los meses de abril y octubre, respectivamente. En función de las dos temporadas de lluvias, si se toman las temporadas ampliadas, se observa que 412 casos (31%) ocurrieron en el periodo marzo-mayo, mientras 441 casos (34%) se reportaron entre septiembre-noviembre.

Además de los resultados presentados previamente, también se pueden construir perfiles epidemiológicos y calcular indicadores como tasa bruta de mortalidad, tasa de mortalidad general y tasa de mortalidad infantil. La palabra tasa o coeficiente se refiere a *la "frecuencia relativa con la que ocurren ciertos hechos en la población durante un tiempo determinado (generalmente un año)"* permitiendo medir su incidencia y comportamiento [41]. También se usa para designar indicadores como sinónimo de relación, proporción o porcentaje, a fin de adquirir valores significativos.

Para demografía, se usan dos tasas de mortalidad: (i) la tasa bruta de mortalidad que se refiere a toda la población en su conjunto; y (ii) la tasa de mortalidad específica que se refiere a subgrupos de la población como las calculadas por región, grupos de edad y sexo que permiten medir la incidencia y comportamiento de mortalidad en Colombia. Por lo general, la tasa de mortalidad es el indicador más utilizado en este tipo de mediciones y se obtiene de la relación entre el número de muertes ocurridas y una estimación de la población expuesta al riesgo de morir en un periodo de tiempo determinado.

Ahora bien, con el propósito de analizar la información de muertes por rayos y medir la mortalidad por rayos, se utilizará la tasa de mortalidad por causa específica. Este indicador representa el número total de muertes por rayos para el periodo 1997-2017 por cada millón de habitantes. De esta manera, la Tasa de Mortalidad Anual (TMA) por causa específica se calculó con la Ecuación (3-1) y la Tasa de Mortalidad Multianual (TMM) con la Ecuación (3-2). Estos resultados servirán para luego hacer una comparación con los estudios presentados en la sección 2.2.

$$Tasa\ de\ Mortalidad\ Anual = \frac{No.\,muertes\ por\ rayos\ anual}{Población\ anual} * 1.000.000 \tag{3-1}$$

$$Tasa\ de\ Mortalidad\ Multianual = \frac{\sum_{i=1997}^{2017} No.\,muertes\ por\ rayos\ (i)}{\sum_{i=1997}^{2017} Población\ (i)} * 1.000.000 \tag{3-2}$$

En la Tabla 3.2 se muestra la Tasa de Mortalidad Anual a nivel nacional. En este caso, la unidad de medida es muertes por millón habitante al año. A partir de los resultados obtenidos se dejaron en color rojo las tasas de mortalidad que superan la tasa de mortalidad obtenida para Colombia.

Tabla 3.2 Tasa de mortalidad anual y multianual en Colombia

Año	Casos	Población	TM	Año	Casos	Población	TM
1997	34	38.635.691	0.88	**2008**	86	44.451.147	1.93
1998	52	39.184.456	1.33	**2009**	79	44.978.832	1.76
1999	71	39.730.798	1.79	**2010**	45	45.509.584	0.99
2000	59	40.295.563	1.46	**2011**	47	46.044.601	1.02
2001	66	40.813.541	1.62	**2012**	65	46.581.823	1.40
2002	53	41.328.824	1.28	**2013**	57	47.121.089	1.21
2003	98	41.848.959	2.34	**2014**	66	47.661.787	1.38
2004	85	42.368.489	2.01	**2015**	50	48.203.405	1.04
2005	93	42.888.592	2.17	**2016**	43	48.747.708	0.88
2006	66	43.405.956	1.52	**2017**	39	49.291.609	0.79
2007	59	43.926.929	1.34	**Total**	**1313**	**923.019.383**	**1.42**

Fuente: Autora

En resumen, la Tasa de Mortalidad Multianual de Colombia para los 21 años fue de 1.42 muertes por millón habitante año, la cual es baja en comparación con la que se obtuvo por *Navarrete et al.* (1.8 muertes por millón habitante año) y por *Cruz* (2.0 muertes por millón habitante año) de acuerdo con [24], [25]. Esta diferencia se debe en parte a que se tiene una ventana de tiempo más amplia y a la baja cantidad de casos reportados (por debajo de la media) en los periodos 1997-2002 y 2011-2017, tal como se observa en la Figura 3.6. Sin embargo, es importante mencionar que los años 2003, 2004, 2005 y 2008 presentaron las tasas más altas de mortalidad con 2.34, 2.01, 2.17 y 1.93 muertes por millón habitante año, respectivamente. Los resultados de mortalidad obtenidos en los años 2003, 2004 y 2005 (más de 80 muertes por rayos al año) se relacionan claramente con la presencia del fenómeno de la niña.

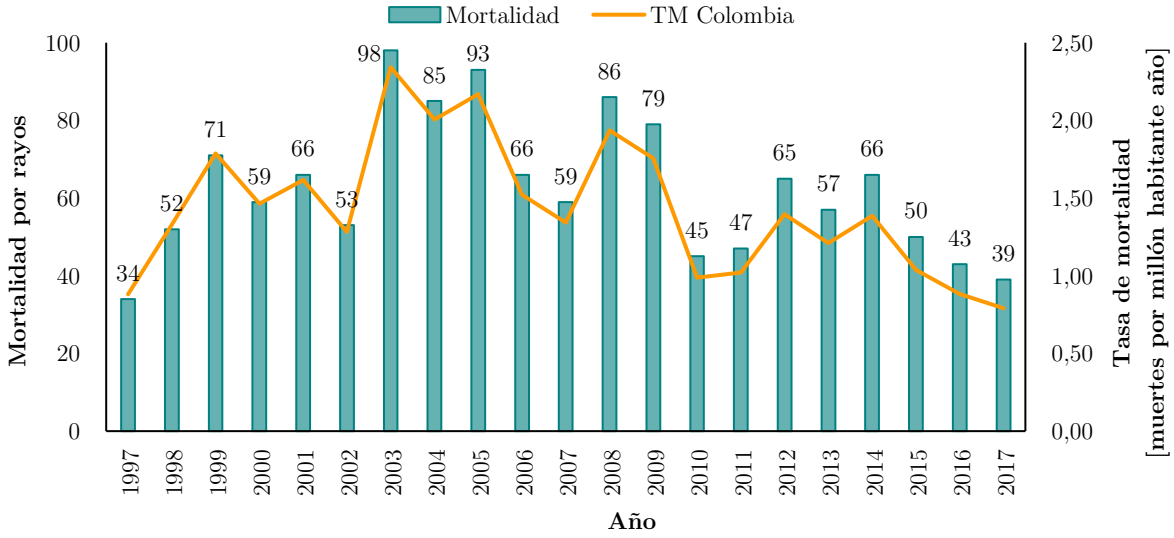


Figura 3.6 Tasa de mortalidad en Colombia para el período 1997-2017
Fuente: Autora

Debido a que en la Figura 3.6 se observa una diferencia de niveles en la mortalidad (uno entre 1997-2008 y otro entre 2008-2017) se utilizó el software estadístico R® para realizar una prueba Mann-Whitney de dos colas. En esta prueba se obtuvo un valor p=1,84%, lo cual ratifica que existe una porción de la figura que venía en aumento y una región que exhibe una disminución en la mortalidad. Este resultado permite inferir que la entrada en vigencia de la NTC 4552 (protección contra rayos) y del RETIE han logrado una disminución estadísticamente significativa en la mortalidad por rayos en Colombia.

Por otra parte, considerando que en Colombia se tiene zona rural y urbana, se calculó la tasa de mortalidad específica para cada una de estas zonas. Esto fue posible teniendo en cuenta que el DANE suministra información por área tanto para la población, como para las defunciones ocurridas a nivel nacional. Siendo así, el DANE clasificó y definió la información de área como [42]:

- *Cabecera municipal* la cual está definida por un perímetro urbano en donde se ubica la sede administrativa del municipio.
- *Área rural o resto municipal* que se caracteriza por la disposición dispersa de viviendas y explotaciones agropecuarias existentes en ella, además esta área no cuenta con un trazado o nomenclatura de calles, carreteras o avenidas.

- *Centro poblado* que es la concentración de mínimo veinte (20) viviendas vecinas o adosadas entre sí, ubicada en el área rural de un municipio o de un corregimiento departamental. Este término fue establecido por el DANE únicamente para fines estadísticos.

De acuerdo con lo anterior, en la Figura 3.7 se observa que la tasa de mortalidad específica por área rural es aproximadamente 10 veces mayor que en el área urbana. Este comportamiento se debe a que en el área rural se cuenta con una población entre 10 y 11 millones de habitantes y se registraron en promedio 48 muertes al año. Entre tanto, el área urbana está comprendida por una población aproximadamente de 38 millones de habitantes donde se registraron menos de 23 casos al año.

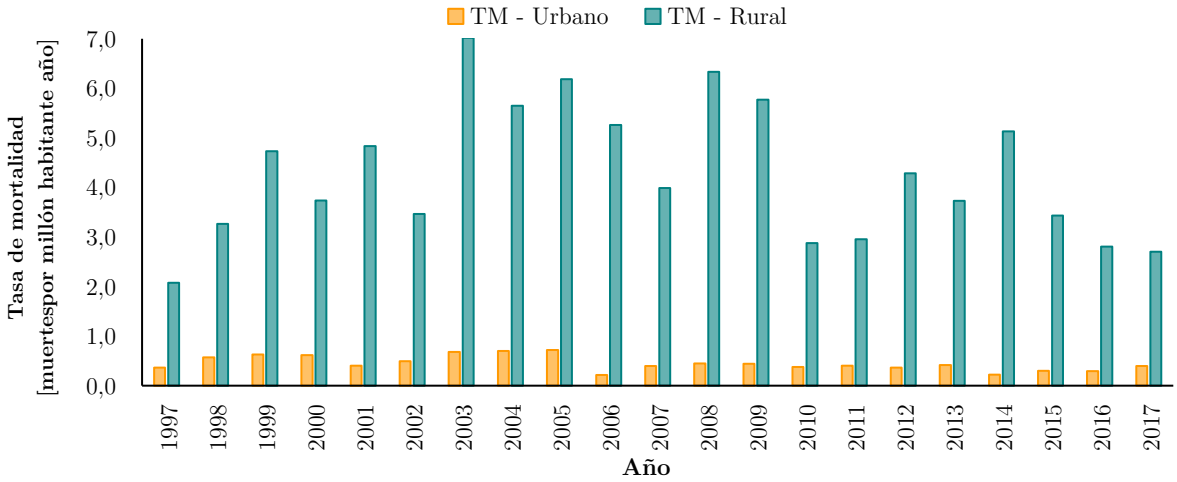


Figura 3.7 Tasa de mortalidad específica en el área rural y urbana para el período 1997-2017
Fuente: Autora

Desde otra perspectiva, en la Figura 3.8 se observa la tasa de mortalidad específica por sexo. Para el género masculino se obtuvo una tasa de mortalidad 4 veces mayor a la tasa de mortalidad del género femenino. En promedio, se registraron por año 51 casos para los hombres y 11 casos para las mujeres con una población entre 19 y 24 millones de habitantes para ambos sexos. En este caso, se concluye que la tasa de mortalidad según el sexo depende de la cantidad de casos registrados y no de la población analizada.

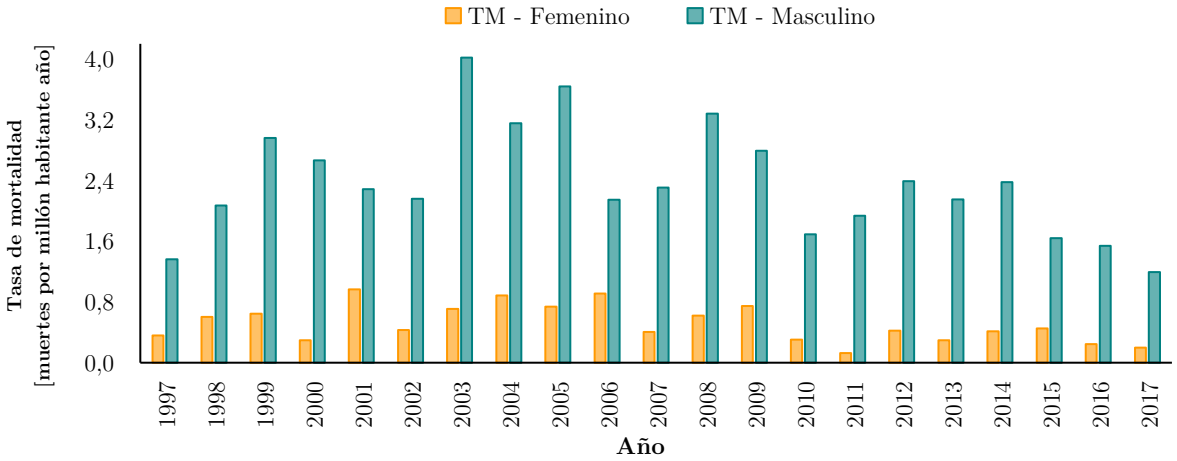


Figura 3.8 Tasa de mortalidad por sexo (masculino - femenino) para el período 1997-2017
Fuente: Autora

3.3.1 Mortalidad por rayos en las subregiones naturales

La mortalidad por rayos en las subregiones naturales definidas en la sección 3.1 se obtuvo a partir de la *base de datos* que se construyó con la información suministrada por el DANE. Adicionalmente, se usó el programa informático Google Earth® y el software Global Mapper® los cuales permiten visualizar información geográfica, así como hacer el procesamiento y tratamiento de datos espaciales.

Con ayuda de la *base de datos* se identificó el departamento y municipio en donde ocurrió el evento. Luego, por medio de Google Earth se buscaron las coordenadas geográficas del evento y se importaron a Global Mapper con el fin de atribuirle la característica del nombre de la subregión natural. Además, dicha información se exportó en un archivo de Excel® para complementar la *base de datos* con las coordenadas, departamento, municipio y el nombre de la subregión natural. De esta manera, la *base de datos* quedó organizada con los parámetros que se muestran en la Figura 3.9.

Víctima	Depto	Año	Mes	Municipio	Región Natural	X	Y	Género	Edad	Área	Sitio
1	Antioquia	1997	Mayo	Cañasgordas	Montaña_Noroeste	-76,026110	6,750597	Masculino	De 40 a 44 años	Centro Poblado (Inspe	Casa/domicilio
1	Antioquia	1997	Mayo	Puerto Berrio	Valle_Magdalena_Medio	-74,408800	6,477755	Masculino	De 15 a 19 años	Centro Poblado (Inspe	Casa/domicilio
1	Antioquia	1999	Julio	Chigorodó	Llanura_Caribe	-76,677490	7,665099	Masculino	De 50 a 54 años	Rural disperso	Otro sitio
1	Antioquia	2002	Agost	Puerto Berrio	Valle_Magdalena_Medio	-74,408800	6,477755	Masculino	De 30 a 34 años	Cabecera Municipal	Lugar de Trabajo
1	Norte de Santander	2010	Octub	Tibú	Catatumbo	-72,737733	8,642356	Masculino	De 20 a 24 años	Centro Poblado (Inspe	Casa/domicilio
1	Boyacá	1998	Septie	Sogamoso	Altiplano_Cundiboyacens	-72,931129	5,716085	Femenino	De 55 a 59 años	Rural disperso	Otro sitio

Figura 3.9 Parámetros que conforman la *base de datos* sobre muertes por rayos.
Fuente: Autora

Tomando la información de la *base de datos* se creó el mapa que se muestra en la Figura 3.10. En este mapa se observan las subregiones naturales y los casos de muertes por rayos (puntos rojos), siendo evidente que en las zonas montañosas del país se han reportado la mayor cantidad de casos de mortalidad. Se debe aclarar que los puntos rojos en el mapa representan la ubicación de los casos, más no cada uno de los casos reportados.

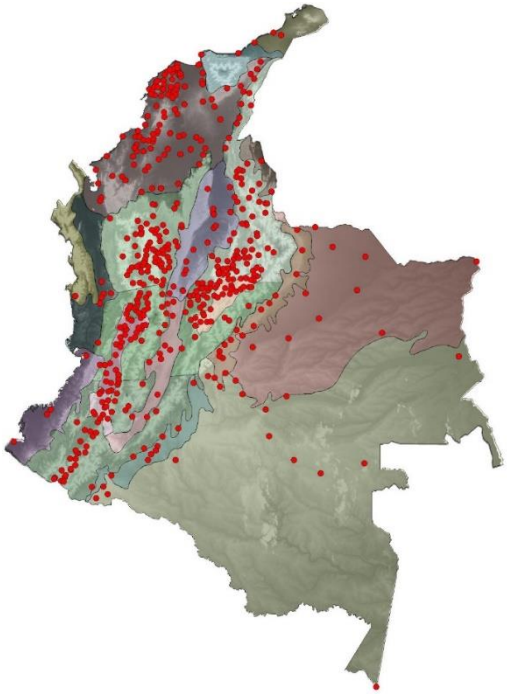


Figura 3.10 Mapa de muertes por rayos en las subregiones naturales para el periodo 1997-2017
Fuente: Autora

Por otra parte, en la Figura 3.11 se observa un diagrama de barras en forma descendente con la mortalidad por rayos y la tasa de mortalidad en cada subregión natural. Los resultados muestran que las subregiones que presentaron la mayor mortalidad fueron Llanura Caribe (292), Montaña Noroeste (206) y Montaña Noreste (135). No obstante, la tasa máxima de mortalidad (TM) se presenta en la subregión del Altiplano de Popayán (AP) siendo de 8.99 muertes por millón habitante año, seguida de la región de Orinoquía (OQ) con 4.65 muertes por millón habitante año.

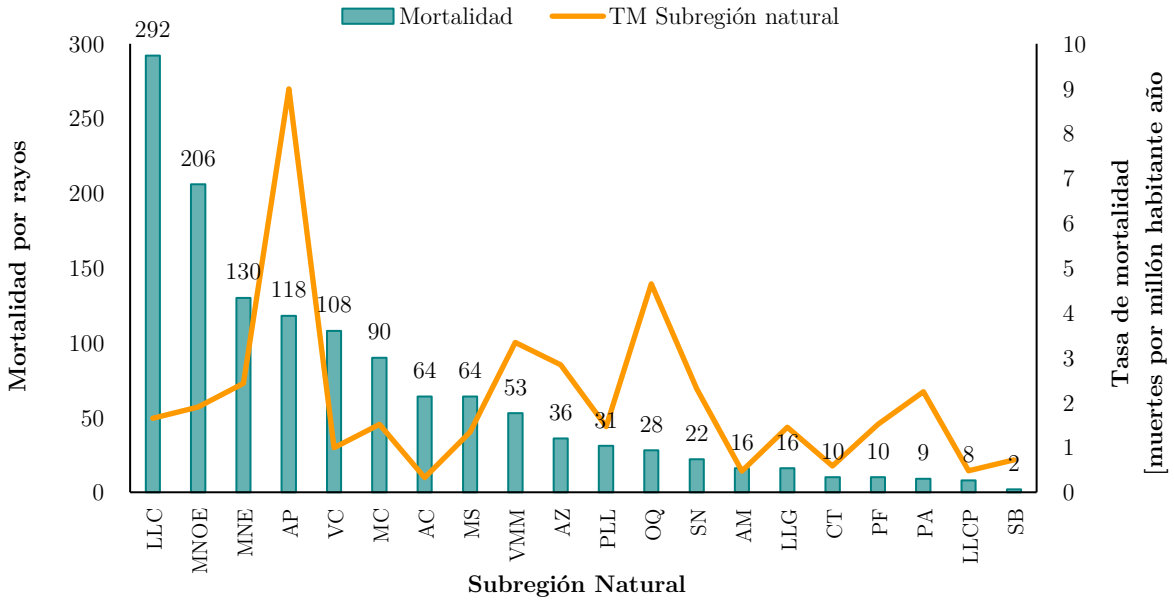


Figura 3.11 Mortalidad y tasa de mortalidad a causa de rayos en las subregiones naturales
Fuente: Autora

Entre tanto, las subregiones con baja población como Amazonía (AZ), Montaña Noreste (MNE), Piedemonte Amazónico (PA), Sierra Nevada (SN) y Valle del Magdalena Medio (VMM) presentan altas mortalidades y tienen una tasa de mortalidad superior a 2.0 muertes por millón habitante año, tal y como se evidencia en la Tabla 3.3. Adicionalmente, se observa en color rojo la tasa de mortalidad de las subregiones naturales que superan la tasa de mortalidad calculada para Colombia.

Tabla 3.3 Valoración de la tasa de mortalidad multianual para cada subregión natural

SRN*	Casos	Población	TM
AC	64	195.554.547	0.33
AP	118	13.118.987	8.99
AM	16	33.693.989	0.47
AZ	36	12.653.757	2.85
CT	10	17.106.882	0.58
LLC	292	177.347.860	1.65
LLCP	8	16.587.149	0.48
LLG	16	11.050.949	1.45
MC	90	59.553.912	1.51
MNE	130	53.603.112	2.43

SN*	Casos	Población	TM
MNOE	206	108.561.468	1.90
MS	64	47.636.935	1.34
OQ	28	6.024.821	4.65
PF	10	6.593.113	2.25
PA	9	4.007.366	1.52
PLL	31	21.128.124	1.47
SB	2	2.761.751	0.72
SN	22	9.540.244	2.31
VC	108	108.658.134	0.99
VMM	53	15.867.236	3.34

*SRN: Subregión Natural

Fuente: Autora

3.3.2 Mortalidad por rayos en departamentos

Continuando con la metodología utilizada en este capítulo también se calculó la mortalidad y la tasa de mortalidad para cada uno de los departamentos de Colombia. Los resultados de mortalidad se muestran de manera descendente en un diagrama de barras en la Figura 3.12. La información analizada muestra que para los departamentos de Antioquia y Cauca se reportaron 242 y 150 casos, respectivamente; que son aquellos que presentan mayor número de casos. En contraste con lo anterior, también se evidencia que el departamento de Vichada presentó la tasa máxima de mortalidad con 9.64 muertes por millón habitante año. Esto se debe a la baja población y a la alta mortalidad reportada.

Dentro de la misma situación, y como se observa en la Tabla 3.4 los departamentos de Cauca, Guainía, Guaviare y Vaupés presentaron tasas significativas de mortalidad con 5.54, 5.25, 4.33 y 3.59 muertes por millón habitante año, respectivamente. Por otra parte, los departamentos de Antioquia y Bogotá, con una población acumulada similar (superior a 120 millones de habitantes), exhiben una tasa de mortalidad muy diferente. Los resultados muestran que la tasa de mortalidad obtenida en Antioquia (1.98) es aproximadamente 20 veces mayor a la de Bogotá (0.1).

Las áreas más vulnerables o expuestas a la mortalidad por rayos en el país son aquellas que se encuentran por encima de la tasa mortalidad calculada a nivel nacional que fue de 1.43 muertes por millón habitante año. Por lo tanto, se considera importante llevar a cabo un seguimiento a aquellas áreas donde la tasa de mortalidad está superando el promedio de Colombia

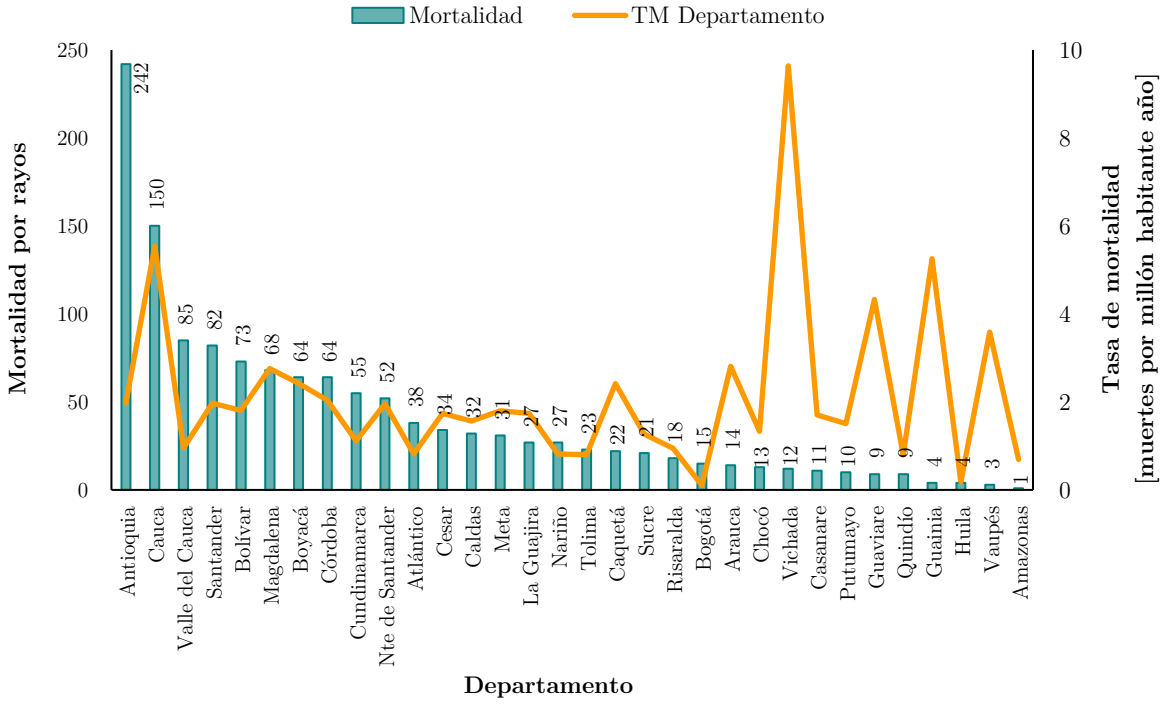


Figura 3.12 Mortalidad y tasa de mortalidad a causa de rayos por departamento
Fuente: Autora

Tabla 3.4 Valoración de la tasa de mortalidad multianual por departamento

D*	Casos	Población	TM	D*	Casos	Población	TM
Antioquia	242	122.520.538	1.98	**Tolima**	23	28.805.723	0.80
Cauca	150	27.089.756	5.54	**Caquetá**	22	9.113.374	2.41
V. Cauca	85	89.361.157	0.95	**Sucre**	21	16.555.192	1.27
Santander	82	41.528.299	1.97	**Risaralda**	18	19.072.255	0.94
Bolívar	73	40.479.590	1.80	**Bogotá**	15	147.855.314	0.10
Magdalena	68	24.658.340	2.76	**Arauca**	14	4.982.788	2.81
Boyacá	64	26.382.923	2.43	**Chocó**	13	9.748.177	1.33
Córdoba	64	31.451.144	2.03	**Vichada**	12	1.245.057	9.64
C/marca	55	49.523.513	1.11	**Casanare**	11	6.450.439	1.71
N. Santander	52	26.589.159	1.96	**Putumayo**	10	6.653.576	1.50
Atlántico	38	46.720.953	0.81	**Guaviare**	9	2.079.765	4.33
Cesar	34	19.529.275	1.74	**Quindío**	9	11.355.834	0.79
Caldas	32	20.426.255	1.57	**Guanía**	4	761.543	5.25
Meta	31	17.214.814	1.80	**Huila**	4	21.830.347	0.18
La Guajira	27	15.535.005	1.74	**Vaupés**	3	836.405	3.59
Nariño	27	33.246.895	0.81	**Amazonas**	1	1.446.931	0.69

*D: Departamento

Fuente: Autora

4 Estimación de los parámetros del rayo en Colombia

4.1 Red Colombiana de detección total de rayos

En el presente capítulo se describirá la metodología con la cual se calcularon el Nivel Ceráunico (NC), la Densidad de Descargas a Tierra (DDT) y la Severidad (S). En primera instancia se debe aclarar que los datos de rayos se tomaron de la información histórica suministrada por la Red Colombiana de Detección Total de Rayos (*CTLDS – Colombian Total Lightning Detection System*). Dicha red entró en operación en septiembre del año 2011 con seis sensores y cada año ha ido ampliando su cobertura. De esta forma, actualmente cuenta con 20 sensores instalados (puntos negros) en diferentes partes del territorio colombiano como se observa en la Figura 4.1. A la fecha, la red ha detectado más de 155 millones de rayos con corrientes superiores a 2 kA (isolíneas).

La red de detección está conformada por sensores altamente sensibles basados en la tecnología LINET, los cuales están ubicados a una distancia de 150 a 250 km aproximadamente. La detección se logra con base en medidas de las radiaciones VLF y LF (ondas electromagnéticas) producidas por los rayos. Luego de la detección, los datos se transmiten a un servidor que calcula la posición geográfica de cada uno de los rayos (flashes y strokes). La red LINET no solo mide la posición del rayo, también registra la magnitud de la corriente, la altura (rayos intranube) y la polaridad de estos. La detección temprana permite identificar el tiempo severo y predecir las tormentas eléctricas [40].

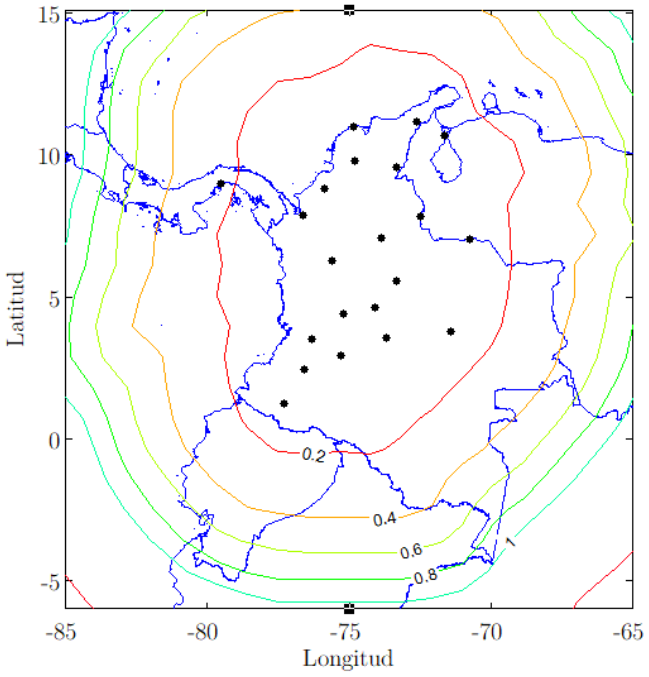


Figura 4.1 Red Colombiana de Detección Total de Rayos
Fuente: Tomado de [43]

De acuerdo con lo anterior, el registro histórico que se tiene a disposición para toda Colombia es del periodo comprendido entre el 2012 y 2017. Por lo tanto, para calcular los parámetros de los rayos se tiene un periodo de seis años, y debido al gran volumen de información, se requiere de una metodología especial para la manipulación y análisis de los datos.

4.2 Nivel Ceráunico (NC)

La primera fase de la metodología es similar para el NC y la DDT teniendo en cuenta que el Standard Internacional IEC 62858 [44] sugiere que el primero se debe calcular en áreas de 15 km x 15 km o de 30 km x 30 km, mientras la DDT se debe calcular con áreas de 1 km x 1 km o de 3 km x 3 km. La diferencia en las áreas sugeridas para cada parámetro radica en el detalle que se puede obtener de la información analizada. Es decir, entre más pequeña sea el área, más detallados serán los resultados.

Como bien se sabe, el NC permite conocer la cantidad de días de tormenta al año que se presentan en un área determinada. Siendo así, a partir de la información analizada, se conocerán la cantidad de días de tormenta al año que se presentaron en cada una de las subregiones naturales definidas en este estudio. Para el cálculo de este parámetro se llevan a cabo una serie de pasos que se muestran en la Figura 4.2.

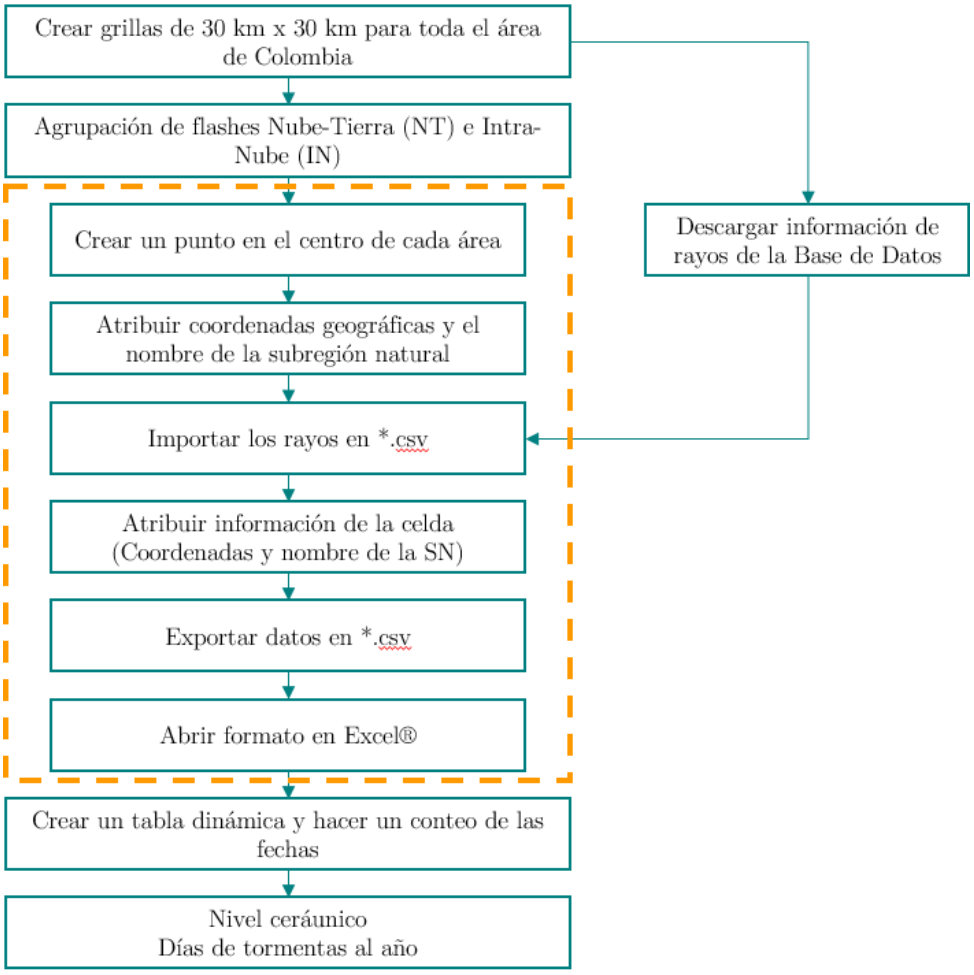


Figura 4.2 Pasos para calcular el Nivel Ceráunico
Fuente: Autora

Las áreas (grillas) se crearon con el software Global Mapper® el cual, dentro de sus características, permite cargar mapas, calcular y medir áreas. Además, permite manipular la información geográfica por medio de archivos *.csv en los cuales los datos se representan en forma de tabla, es decir, las columnas están separadas por comas o puntos y coma, mientras las filas por saltos de línea. Esto permite que los datos se puedan trabajar tanto Excel® como en Global Mapper®.

Siguiendo la metodología descrita en la Figura 4.2, la Tabla 4.1 muestra los valores promedio del NC para cada subregión natural durante los años bajo estudio (2012-2017). En esta tabla se resaltan en rojo los datos donde se presentó el máximo NC cada año. De este análisis se identificó, para el periodo analizado, que el mayor NC se registró en el año 2015 en la subregión natural del Pacífico (PF) con 243 días de tormenta, y el menor, en la Llanura Guajira (LLG) con 30 días de tormenta durante 2013. Por su parte, las regiones con mayor y menor NC promedio son la Montaña Noroeste (MNOE) y la Llanura Guajira (LLG), las cuales presentaron 219 y 57 días de tormenta al año, respectivamente. Adicionalmente, Montaña Noroeste (MNOE), Pacífico (PF), Serranía del Baudó (SB) y Valle del Cauca (VC) presentaron tres o más años con Niveles Ceráunicos por encima de 200 días de tormentas al año.

Tabla 4.1 Nivel Ceráunico promedio en Colombia desde 2012 hasta 2017

SN	2012	2013	2014	2015	2016	2017
AC	141	106	100	90	135	153
AP	165	152	124	172	203	206
AM	129	107	101	103	133	167
AZ	124	89	97	125	140	147
CT	204	154	125	144	174	200
LLC	182	121	111	151	175	204
LLCP	150	99	79	173	144	165
LLG	56	30	33	39	104	78
MC	167	132	127	145	161	176
MNE	170	127	125	139	163	172
MNOE	239	199	194	219	223	240
MS	96	75	64	95	113	158
OQ	139	91	87	126	134	138
PF	236	187	196	243	204	216
PA	116	99	86	107	126	164
PLL	132	97	87	100	127	130
SB	212	159	167	216	190	200
SN	145	93	96	130	165	176
VC	206	171	159	216	220	215
VMM	207	177	167	183	193	209

Unidad: días de tormenta al año

Fuente: Autora

4.3 Densidad de Descargas a Tierra (DDT)

El primer indicador para conocer la incidencia de rayos en cada una de las subregiones naturales es la DDT. Por lo general, este parámetro se calcula a partir de la detección registrada por contadores de rayos, sistemas de localización de rayos y sistemas ópticos instalados en satélites [6], [7]. En el caso de Colombia, se han logrado elaborar mapas aproximados de la DDT desde 2004 a partir de la información que suministran las redes globales de localización de rayos. Dicha información ha permitido identificar aquellas zonas con mayor actividad de rayos, aunque las largas distancias a las que se encuentran ubicados los sensores han hecho que las eficiencias de detección varíen de acuerdo con la ampliación que tenga la red.

De forma directa, el parámetro de la DDT se comenzó a calcular en Colombia desde el año 1997 con ayuda de la Red de Detección y Medición de Descargas Eléctricas (RECMA) propiedad de la empresa Interconexión Eléctrica S.A (ISA). De esta manera, se elaboraron los primeros mapas de DDT para el territorio colombiano. Teniendo en cuenta estos antecedentes, y la metodología usada en dichas experiencias, en la Figura 4.3 se describen los pasos que se aplicaron en este trabajo para calcular la DDT de acuerdo con la información registrada por la red LINET.

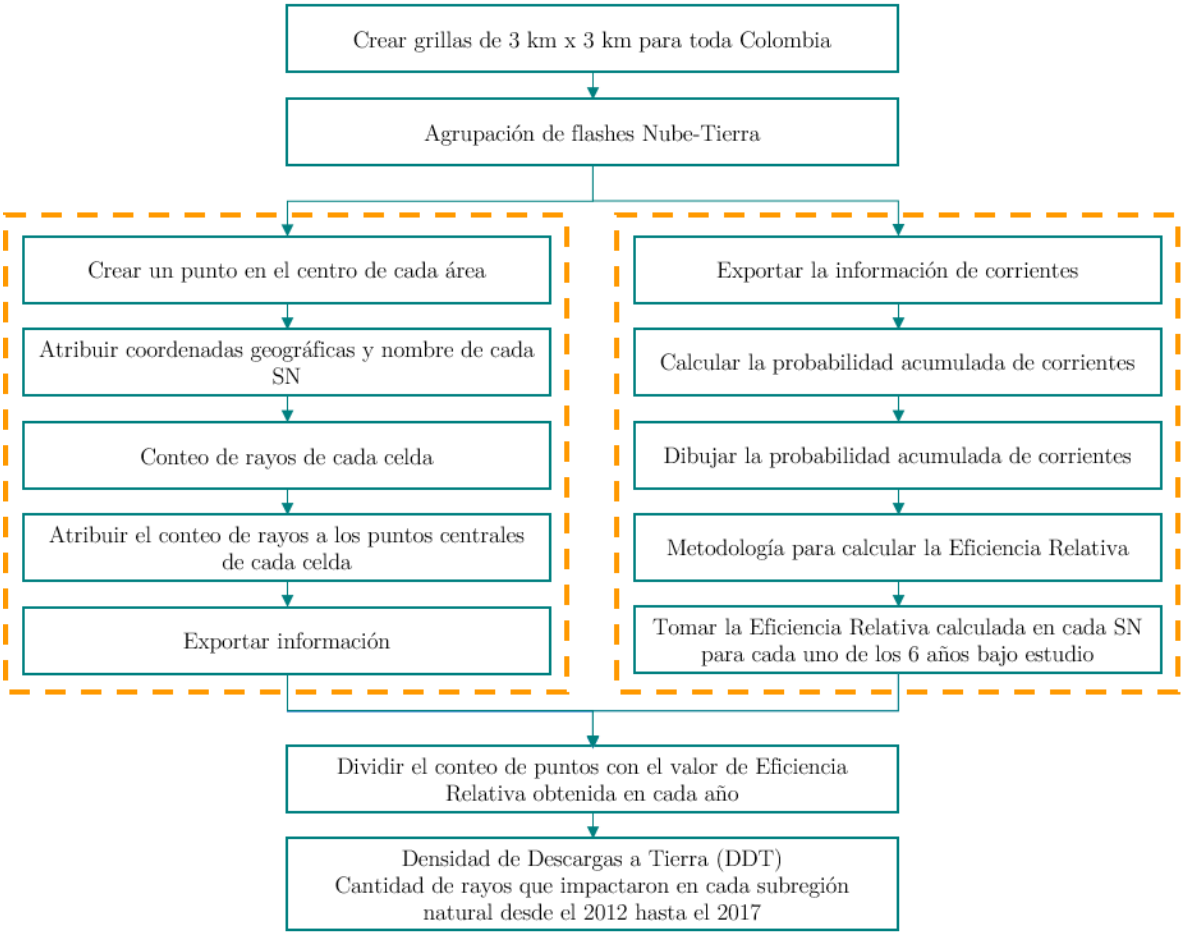


Figura 4.3 Pasos para calcular la Densidad de Descargas a Tierra
Fuente: Autora

Uno de los pasos mencionados en la Figura 4.3 es la eficiencia relativa de detección la cual se refiere a la probabilidad que tiene la red de detectar y localizar un rayo en una determinada área de referencia en relación con los que realmente se producen [45]. Cabe mencionar que, la eficiencia relativa de detección aumentará a medida que se vayan instalando sensores en una red de detección y localización de rayos. Sin embargo, se considera importante llevar a cabo un método para corregir los valores de la DDT así como evaluar la calidad de los parámetros del rayo y para esto se hace uso de la metodología del capítulo 9 de [46].

De acuerdo con la metodología, se debe graficar la distribución acumulada de corriente debido a que esta proporciona un método para estimar la eficiencia relativa de detección entre dos condiciones o regiones, es decir, condición de referencia y condición de prueba. Teniendo en cuenta que se debe trabajar con las corrientes de cada uno de los rayos que impactaron en las subregiones naturales y que estas áreas son de gran tamaño, se decidió hacer una grilla para toda Colombia con 157 cuadros, cada cuadro con un área de $100x100\ km$. Así que, se tomará uno de los cuadros para dar un ejemplo de la metodología usada para calcular la eficiencia relativa de detección. En primera instancia, se tomaron las corrientes de cada uno de los rayos que impactaron en el cuadro con el propósito de sacar la distribución acumulada de corrientes para cada uno de los años bajo estudio.

Como se mencionó anteriormente, la eficiencia relativa de detección se debe calcular bajo la condición de prueba y de referencia. En la Figura 4.6 se observa la condición de prueba que será cada uno de los años bajo estudio y la condición de referencia que corresponde a la distribución acumulada de corrientes que impactaron en el año 2017 en el Magdalena Medio debido a que en esta zona se encuentra la mayor concentración de sensores de LINET.

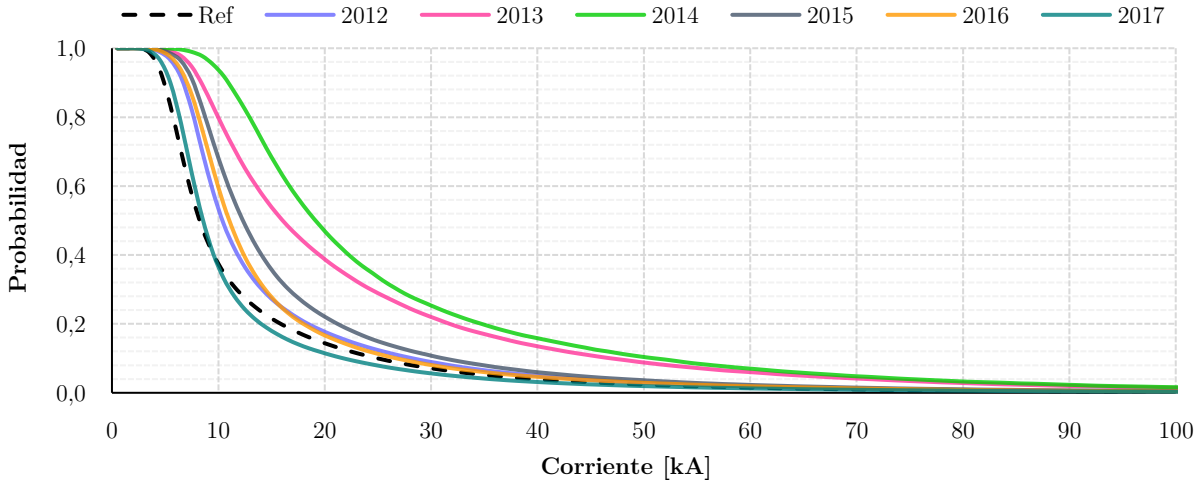


Figura 4.4 Distribución acumulada de corriente
Fuente: Autora

Luego, se debe determinar el factor de escala (SF) de error por medio de mínimos cuadrados para igualar la forma de la distribución acumulada de prueba con la distribución acumulada de referencia, este factor de escala se calcula a partir de la Ecuación (4-1). Donde, la curva de referencia de denomina C_r y la curva de prueba se denomina C_p.

$$SF(I_o) = \frac{\sum_{i=I_{máx}}^{i=I_o} C_r(i) * C_r(i)}{\sum_{i=I_{máx}}^{i=I_o} C_p(i) * C_r(i)} \tag{4-1}$$

De esta manera, en la Figura 4.7 se observa el valor de eficiencia relativa de detección que se obtuvo para cada uno de los años bajo estudio.

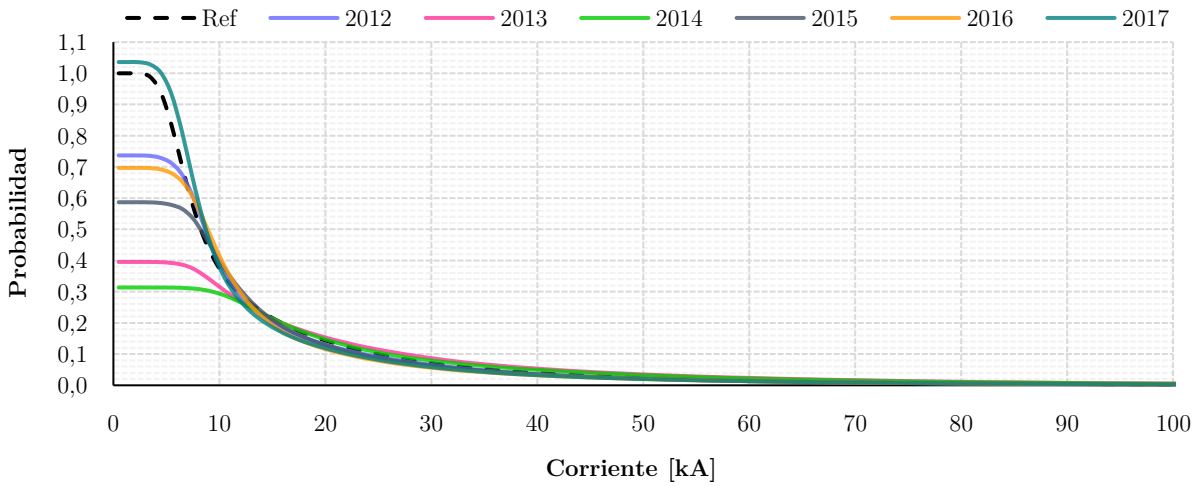


Figura 4.5 Distribución acumulada de corriente (Ajustada)
Fuente: Autora

Luego de tener el valor de la eficiencia relativa de detección por año para cada cuadro $100x100\ km$, se procedió a dividir dicho valor con el conteo de puntos de cada cuadro de $3x3\ km$. De esta manera, se obtuvo el valor de la DDT para cada cuadro de $3x3\ km$ donde cada uno de ellos corresponde a un área de la subregión natural. De acuerdo con la unidad de medida, se debe dividir el valor de la DDT calculada con el área de cada cuadro, resultando así una unidad de medida de flash/km^2-año.

Con base en lo anterior, la Figura 4.6 presenta el valor de DDT promedio registrado para cada subregión natural durante el periodo 2012-2017. Los resultados muestran que las subregiones naturales con mayor actividad de rayos fueron el Catatumbo (CT), la Llanura Caribe (LLC), la Montaña Noroeste (MNOE), el Pacífico (PF), la Serranía del Baudó (SB) y el Valle del Magdalena Medio (VMM) superando el promedio multianual (14 rayos/km^2-año) de los valores promedio registrados. También se observó que la subregión natural del Pacífico (PF) presentó el valor promedio más alto de la DDT con 58 rayos/km^2 en 2015, mientras que, la DDT más baja se reportó en 2014 en la Montaña Sur (MS) con 2 rayos/km^2.

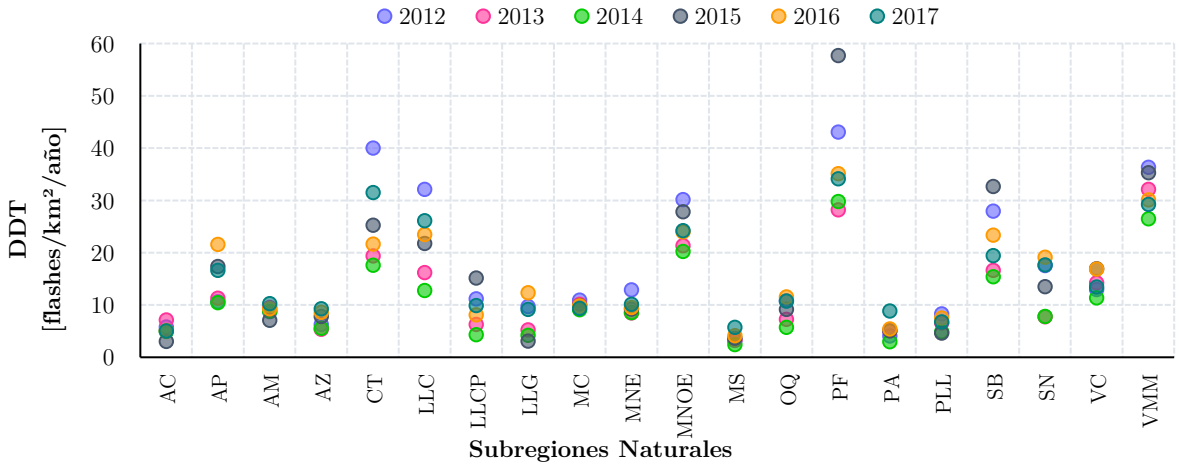


Figura 4.6 Valor promedio de la DDT anual en cada subregión natural
Fuente: Autora

Por otra parte, en la Tabla 4.2 se muestran los valores de DDT promedio para cada una de las de subregiones naturales, resaltando en rojo las DDT más altas por cada año (columna). Este parámetro se calculó a partir de los valores de la DDT obtenida en cada uno de los cuadros de $3x3\ km$ que hacen parte de las subregiones naturales. Es importante mencionar el caso de la subregión del Pacífico (PF), la cual presenta los mayores valores promedio de DDT en Colombia para el periodo estudiado, excepto 2013. Para esta subregión, los valores promedio de DDT variaron entre 30 y 58 rayos/km^2-año. En su contraparte, la subregión Montaña Sur (MS) presenta los menores promedios de DDT para el país, variando entre 2 y 6 rayos/km^2-año.

Tabla 4.2 DDT promedio desde el año 2012 hasta el año 2017

SN	2012	2013	2014	2015	2016	2017
AC	6	7	5	3	5	5
AP	11	11	10	17	22	17
AM	9	10	9	7	9	10
AZ	6	5	6	8	9	9
CT	40	19	18	25	22	32
LLC	32	16	13	22	24	26
LLCP	11	6	4	15	8	10
LLG	10	5	4	3	12	9
MC	11	10	9	10	10	9
MNE	13	9	9	9	10	10
MNOE	30	21	20	28	24	24
MS	3	3	2	4	4	6
OQ	11	7	6	9	12	11
PF	43	28	30	58	35	34
PA	4	5	3	5	5	9
PLL	8	7	5	5	8	7
SB	28	17	15	33	23	19
SN	18	8	8	14	19	18
VC	13	14	11	17	17	13
VMM	36	32	27	35	30	29

Unidad: rayos/km^2-año

Fuente: Autora

Para ilustrar de mejor forma los valores obtenidos, se elaboró el mapa de DDT para todo el territorio colombiano, tal y como se muestra en la Figura 4.7. En este mapa se observa que las subregiones con mayor DDT fueron Pacífico (PF), Valle del Magdalena Medio (VMM) y Montaña Noroeste (MNOE). Estos resultados se pueden relacionar con los altos reportes de muertes por rayos reportados en la Figura 3.10.

ESPACIO DEJADO EN BLANCO DE MANERA INTENCIONAL

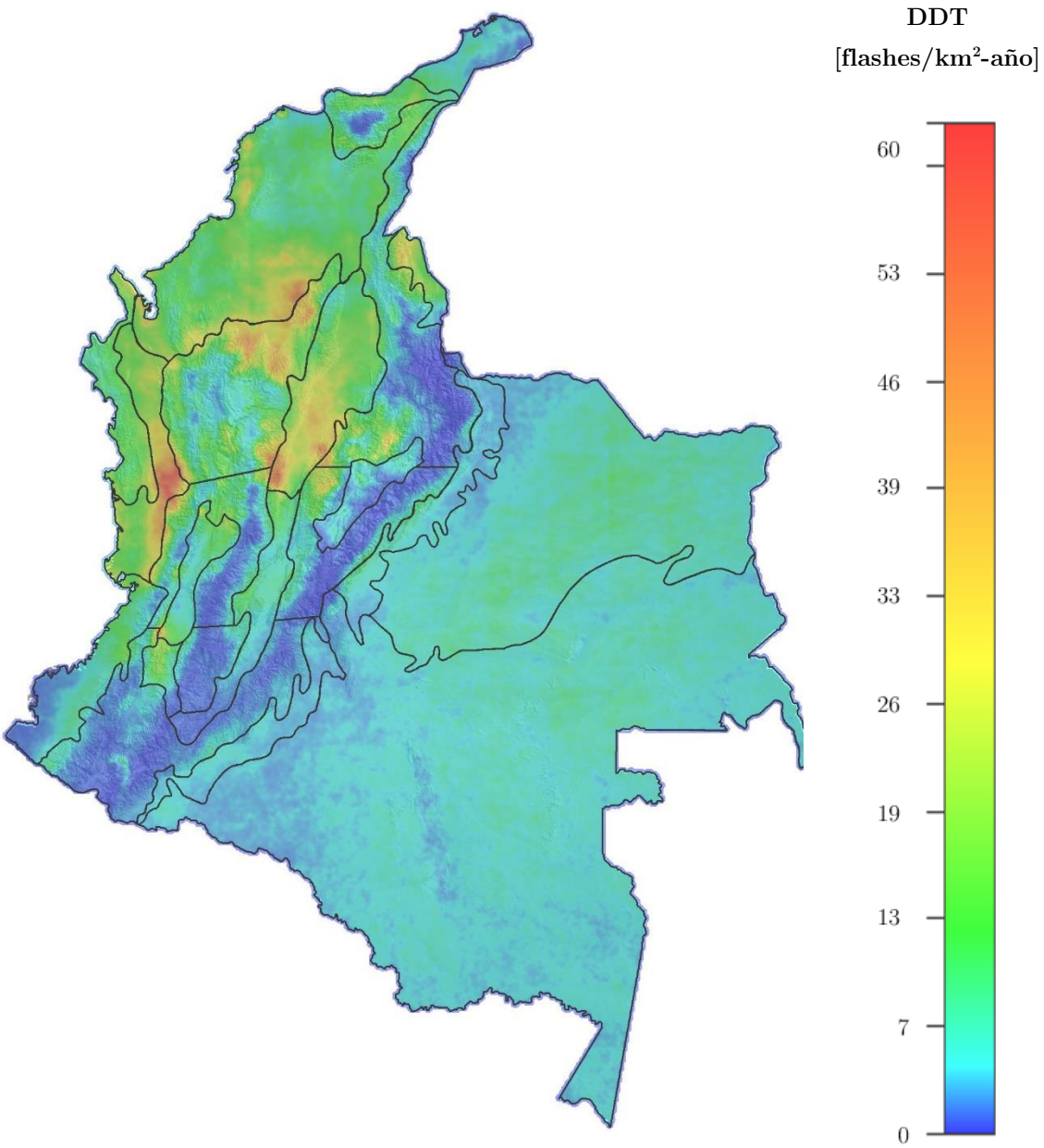


Figura 4.7 Mapa de DDT para Colombia durante el periodo comprendido entre 2012 - 2017
Fuente: Autora

4.4 Severidad (S)

El tiempo severo es una condición en la que el fenómeno natural altamente destructivo y hace referencia a tormentas severas, las cuales se definen como tormentas susceptibles de producir daños materiales, muertes o ambos. Las tormentas severas son tormentas convectivas conformadas por un gran número de tormentas multicelulares, es decir, varias celdas de tormenta. Según el Departamento de Ciencias Atmosféricas de Illinois, las tormentas convectivas son las responsables de fenómenos atmosféricos severos tales como: rayos, lluvias intensas, granizo, vientos fuertes y tornados [43],[47]. Las tormentas convectivas se presentan durante las temporadas cálidas en latitudes medias y en zonas tropicales [47]

y pueden cubrir áreas de hasta cientos de miles de kilómetros cuadrados. Además, son aquellas que presentan la mayor actividad de rayos a nivel mundial [4, 5].

La actividad de rayos se identifica por medio de parámetros como la DDT, el NC y la incidencia de rayos, tal y como se mencionó en la sección 2. De esta manera, los estudios presentados en [6-10] señalan que tanto Colombia como Venezuela presentan altos valores de DDT. Esta información se presenta en la Tabla 4.3. Algunas de las razones por las que se obtienen valores tan altos de actividad de rayos son el efecto de la Zona de Convergencia Intertropical, al sistema montañoso andino y la variación de altura [14].

Según [18, 19 y 20] algunas características que permiten describir la severidad de las tormentas eléctricas son: duración, tasa de rayos nube-tierra y la relación de rayos intranube y nube-tierra, entre otros. Siendo así, las redes de detección con las que cuentan diferentes países obtuvieron una tasa de rayos entre 30 y 100 rayos por minuto [18 y 22].

Tabla 4.3 Top 9 de los lugares con mayor actividad de rayos en Colombia y Venezuela

Ranking global	Lugar	País	DDT [rayos NT*/km²-año]
1	Lago de Maracaibo	Venezuela	74.0
4	Cáceres	Colombia	49.5
7	El Tarra	Colombia	38.5
11	Norcasia	Colombia	77.9
18	Majagual	Colombia	61.1
25	Turbo	Colombia	65.2
46	Barrancas	Colombia	26.9
78	El Corozo	Venezuela	20.3
136	Santa Rosa	Colombia	24.5

NT: Nube-Tierra*

Fuente: Tomado de [48]

Las investigaciones sobre los fenómenos severos se han hecho más necesarias y frecuentes a nivel nacional e internacional. Si se analiza el caso colombiano, respecto a los fenómenos severos, se encuentra que existen dos épocas de lluvias intensas las cuales tienen como consecuencias deslizamientos e inundaciones. Dichas épocas suelen ser más severas en abril y octubre, meses donde se ha registrado una alta actividad de rayos y en donde se ha reportado la mayor cantidad de casos de pérdida de vidas humanas, tal y como se evidenció en la Figura 3.5.

A partir de lo anterior, se buscó en la base de datos de la Red Colombiana de Detección Total de Rayos los eventos con mayor severidad en cada subregión natural (ver Anexo A: Máxima actividad de rayos por año y subregión natural). Esto con el fin de analizar las tormentas registradas, y así, conocer su duración y la cantidad máxima de flashes por minuto. Adicionalmente, se obtuvo para cada fecha la cantidad de flashes por minuto que impactaron el territorio colombiano durante un día. Esto último, con el fin de verificar que el día de mayor actividad de rayos fuese el día con mayor cantidad de flashes por minuto. Sin embargo, al realizar dicho análisis se encontró que el día de mayor actividad no es aquel con la mayor cantidad de flashes por minuto.

Para ilustrar lo dicho en el párrafo anterior, a manera de ejemplo se analizó la tormenta presentada en la subregión del Valle del Magdalena Medio (VMM) entre el 30 de septiembre y el 01 de octubre del 2015. En este caso se reportó una alta actividad de rayos el 30 de septiembre con un total de 30.373 (ver Anexo A: Máxima actividad de rayos por año y subregión natural). A partir de este dato se esperaría que en dicho día también se haya presentado la mayor cantidad de rayos (flashes) por minuto. No obstante, como se puede observar en la Figura 4.8, el 30 de septiembre fue el día con mayor actividad de rayos por minuto con 279 flashes/min, aunque solo impactaron 2595 rayos, mientras que el 01 de octubre impactaron 103 flashes/min. De este análisis, se concluyó que la actividad de rayos no puede definir una tormenta severa, pero sí se puede hablar de severidad a partir de la cantidad de rayos por minuto.

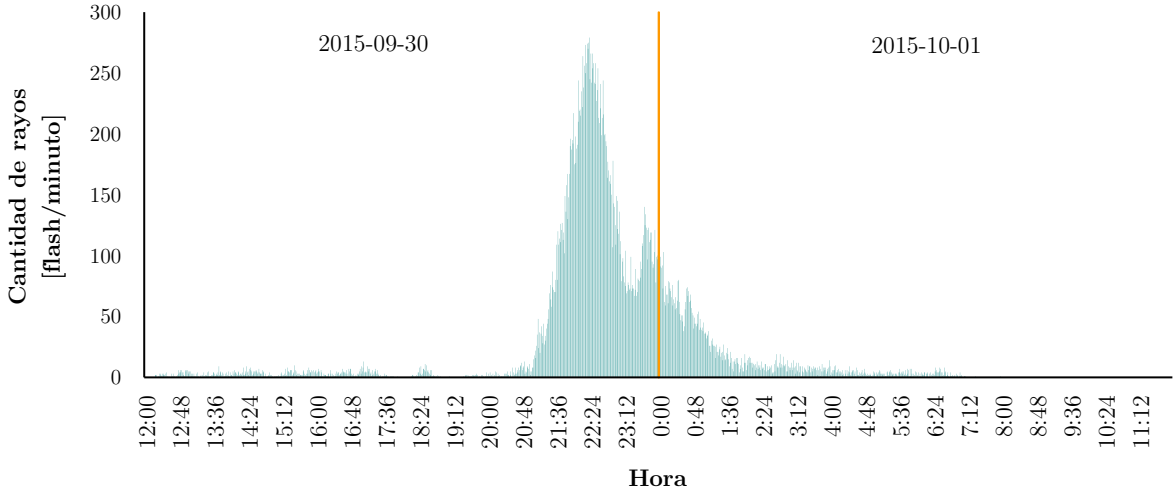


Figura 4.8 Cantidad de flashes por minuto en la subregión Valle del Magdalena Medio
Fuente: Autora

Por otra parte, el análisis mostrado en [49] permite respaldar la idea de definir una tormenta severa a partir de la cantidad de flashes por minuto en un área determinada. Dicho estudio entrega resultados de uno de los casos más severos que ha detectado la Red Colombiana de Detección Total de Rayos, incluyendo en el análisis la altitud del área bajo estudio. Para el caso analizado, la tormenta del 20 de septiembre de 2016 recorrió durante 17 horas un área aproximada de 373.000 km^2, encontrando una tasa máxima de 455 strokes/min para altitudes por debajo de 500 msnm, para altitudes entre 500 y 1.000 msnm fue de 90 strokes/min, para altitudes entre 1.000 y 2.000 msnm fue de 49 strokes/min y la tasa de rayos para altitudes por encima de 2.000 msnm fue de 35 strokes/min.

A partir del análisis presentado en los párrafos anteriores, y tomando como base la información de flashes por minuto calculada con los datos de la Red Colombiana de Detección Total de Rayos, en la Figura 4.9 se observa la cantidad máxima de flashes por minuto que impactaron cada subregión natural estudiada. Los resultados muestran que las subregiones donde impactaron más flashes por minuto fueron la Llanura Caribe (LLC) para los años 2012 (262 flash/min) y 2017 (519 flash /min) y el Valle del Magdalena Medio (VMM) para los años 2013 (251 flash/min), 2014 (141 flash /min), 2015 (279 flash /min) y 2016 (283 flash /min). Para todo el territorio nacional, en promedio, impactaron un máximo de 72 flash/min y como mínimo 1 flash/min.

Cabe mencionar que, la cantidad máxima de rayos por minuto se mantuvo en un rango constante (variaciones entre 30 y 60 flash/min) en las regiones del Altiplano Cundiboyacense (AC), Altiplano Popayán (AP), Llanura Costera del Pacífico (LLCP), Montaña Sur (MS), Piedemonte Amazónico (PA), Serranía del Baudó (SB), Sierra Nevada (SN) y Valle del Cauca (VC). Mientras que, en las subregiones Llanura Caribe (LLC), Montaña Noroeste (MNOE) y Valle del Magdalena Medio (VVM) se observa una variación superior al 50 % entre los valores máximos y mínimos de los rayos registrados por minuto.

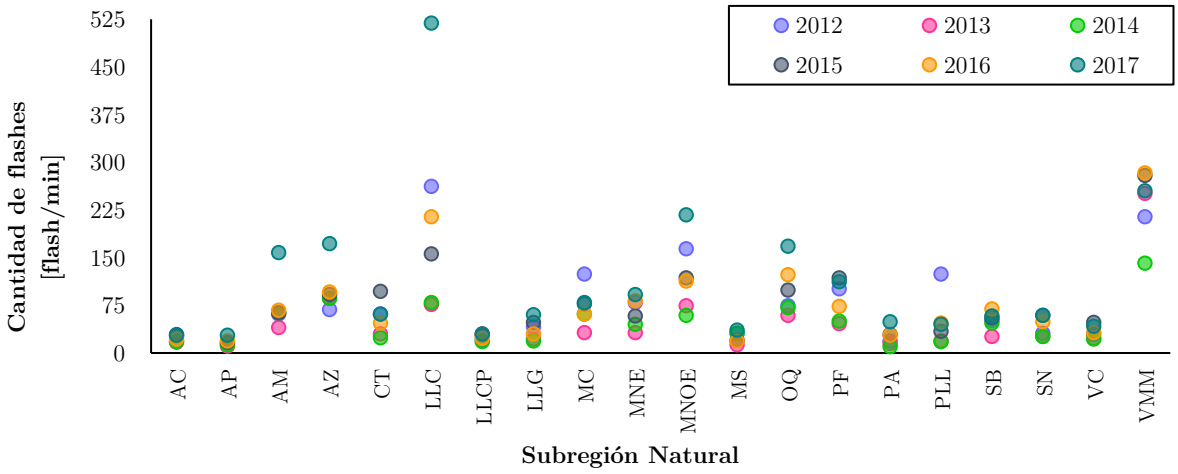


Figura 4.9 Cantidad máxima de flashes que impactaron en un minuto
Fuente: Autora

A partir de la información disponible, y con el propósito de medir la severidad, se decidió analizar la cantidad de flashes por minuto por medio de percentiles, siendo esta una medida de posición no central. Como bien se sabe, los percentiles son aquellos que representan valores de la variable que están por debajo de un porcentaje, el cual puede ser un valor entre el 1% y 100%, es decir, que los datos se dividen en 100 partes iguales. Los percentiles se representan con la letra P, la cual va acompañada de un subíndice equivalente al porcentaje de los datos acumulados. Por ejemplo, P_{90} será el valor que agrupa el 90% de los datos analizados. Lo que se busca con este análisis es determinar cuáles son los flashes severos por minuto que impactan cada una de las subregiones naturales.

Para este trabajo se definirá que la medida de la severidad de una tormenta estará dada por la cantidad de flashes por minuto para el percentil 95% (P_{95}). A modo de ejemplo, se tomó la información de los flashes por minuto que se detectaron en el Valle del Magdalena Medio (VMM) durante el 2015 y se obtuvo un P_{95} de 91 flashes por minuto aproximadamente. Este comportamiento se muestra en la Figura 4.10. En este caso, al calcular el P_{95} para los demás años se obtuvo que la tormenta más severa registrada en dicha región fue en el año 2016 con 112 rayos por minuto, tal y como se observa en la Tabla 4.4. En promedio, se tiene que las tormentas severas en el VMM superan 86 flashes por minuto.

Adicionalmente, en la Tabla 4.4. se muestra el P_{95} calculado en cada subregión natural para los años bajo estudio. La subregión de la Llanura Caribe (LLC) presentó en el 2012 y 2017 las tormentas más severas siendo de 113 y 134 flashes por minuto, respectivamente. Por otra parte, se encuentran las subregiones de la Montaña Noroeste (MNOE) y el Valle del Magdalena Medio (VMM) con más de 108 flashes por minuto. En esta última subregión, se tienen las tormentas más severas con un promedio multianual de 86 flashes por minuto, mientras las menos severas se observan en la región Altiplano Popayán (AP) con un promedio multianual de 8 flashes por minuto.

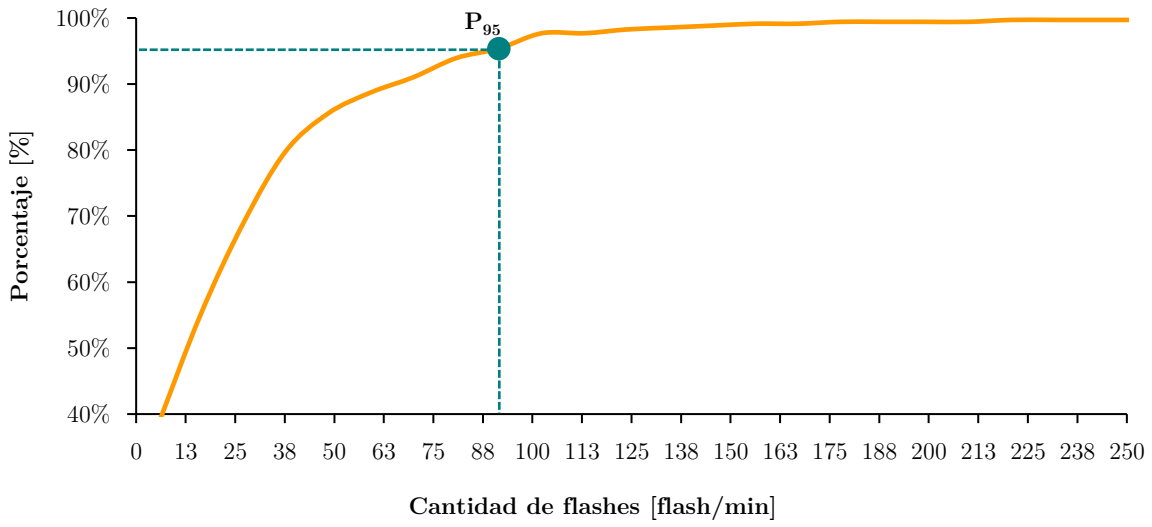


Figura 4.10 Percentil 95 (P_{95}) en la subregión del Valle del Magdalena Medio en el año 2015
Fuente: Autora

Tabla 4.4 Percentil 95 (P95) anual en cada subregión natural

SN	2012	2013	2014	2015	2016	2017
AC	11	10	8	9	12	11
AP	7	6	6	8	9	10
AM	19	14	13	19	26	28
AZ	35	29	30	45	45	62
CT	27	12	12	27	21	31
LLC	113	38	28	29	77	134
LLCP	13	6	6	14	10	11
LLG	14	16	14	8	18	18
MC	23	17	17	25	28	35
MNE	38	19	18	25	32	36
MNOE	72	34	31	63	69	108
MS	10	7	6	9	10	17
OQ	48	33	28	41	49	60
PF	34	21	21	45	39	45
PA	7	7	4	9	10	19
PLL	18	11	12	14	17	21
SB	18	11	11	26	22	23
SN	17	10	9	14	22	21
VC	11	9	8	13	16	16
VMM	97	63	44	91	112	108

Unidad: rayos/minuto

Fuente: Autora

Por otra parte, en la Figura 4.11 se muestra el comportamiento de la cantidad total de rayos que impactaron en toda Colombia de acuerdo con el percentil 95 calculado para cada mes. Los resultados evidencian que los meses de mayor actividad de rayos son abril y octubre, lo cual se relaciona directamente con las temporadas de lluvias intensas que se presenta en el país.

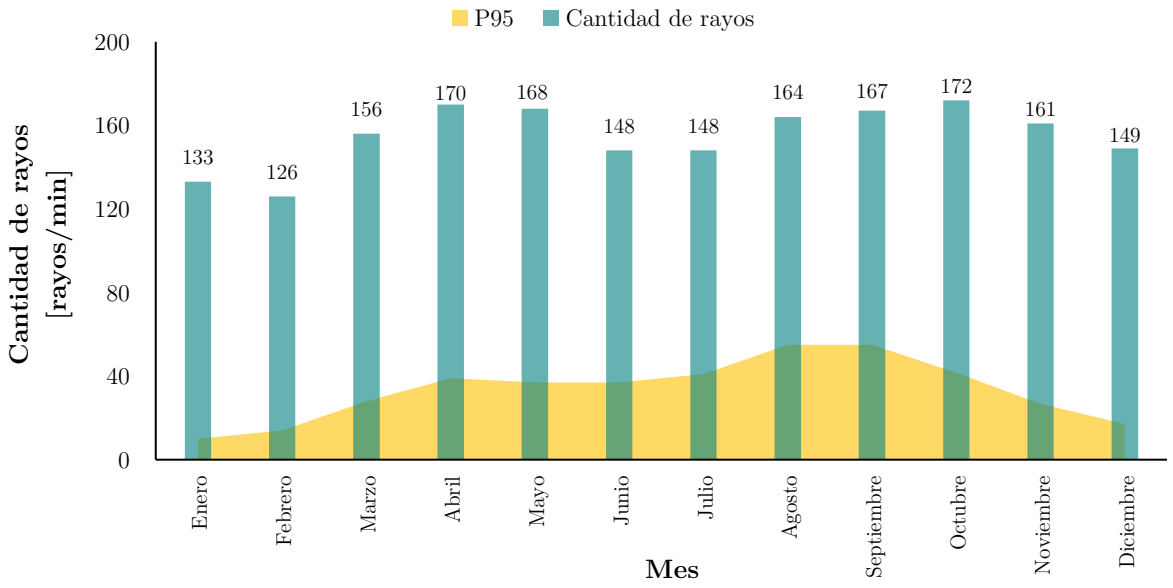


Figura 4.11 Cantidad de rayos mensual con el P95
Fuente: Autora

5 Propuesta para calcular el riesgo por rayos

Teniendo en cuenta los objetivos, el alcance y la información que se ha presentado a lo largo del trabajo, uno de los objetivos planteados es relacionar el riesgo con el fenómeno del rayo. Por tal razón, en este capítulo se expone la relación existente entre ambos temas con el fin de poder analizar de manera integral el **riesgo por rayos en Colombia**.

5.1 Factores que influyen en la estimación del riesgo por rayos

En el capítulo 2 se mencionaron tres factores de riesgo Nivel I conocidos como peligrosidad, exposición y vulnerabilidad, los cuales influyen en la identificación, evaluación y análisis del riesgo. En primera instancia, se describirá el factor de **peligrosidad o peligro** siendo este el principal factor involucrado cuando se habla de riesgo ya que, si existe peligro, existe riesgo.

La peligrosidad se define como un conjunto de aspectos naturales, no sociales de un fenómeno que tiene incidencia en el riesgo llegando a causar lesiones, daños y pérdidas (materiales, económicas, humanas, entre otras). La peligrosidad también se refiere a la frecuencia de ocurrencia de un evento en una zona específica, y para calcularla, se requiere tener un registro histórico del área o la zona bajo estudio. Dentro de la peligrosidad se presentan tres factores: la distribución geográfica del suceso, el tiempo de retorno o intervalo de recurrencia y el grado de peligrosidad, los cuales se mencionarán de aquí en adelante como factores de Nivel II.

La **distribución geográfica del suceso** se refiere a aquellas zonas que han sido afectadas anteriormente por algún evento. Esto es relevante dado que los riesgos naturales se presentan en cualquier lugar. Además, es importante establecer la extensión superficial afectada por dicho evento. Dado lo anterior, la distribución geográfica se relaciona con la **Densidad de Descargas a Tierra (DDT),** siendo este un parámetro que indica el número de descargas a tierra por kilómetro cuadrado al año que impactan en un área de un kilómetro cuadrado.

El segundo factor involucrado en la peligrosidad es **el tiempo de retorno o intervalo de recurrencia**, mediante el cual se determina la periodicidad o frecuencia con que se repite el suceso. Este parámetro se calcula a partir de los eventos ocurridos en el pasado, es decir, que se requiere de los registros históricos. Por lo tanto, el parámetro de los rayos que se relaciona con dicho factor es el **Nivel Ceráunico**, siendo este, el número de días tormentosos al año.

El último factor de Nivel II se llama **grado de peligrosidad o severidad** el cual se basa en antecedentes históricos ocurridos acerca de un mismo suceso. Por lo tanto, es el factor que indica la intensidad con la cual un fenómeno puede afectar una zona determinada. En algunas ocasiones, la severidad se analiza por medio de un valor máximo y un valor mínimo. El valor máximo es el evento de mayor magnitud en el registro histórico y el valor mínimo es el evento cuya intensidad es más frecuente. Para determinar la severidad se requiere conocer la naturaleza del evento, la magnitud, la distribución geográfica y la frecuencia.

De acuerdo con la descripción dada en el párrafo anterior, el grado de peligrosidad o severidad se relacionará con el **tiempo severo**, específicamente con la cantidad de rayos que se encuentren en el percentil 95 y que afectan la zona bajo estudio. Teniendo en cuenta que los registros históricos de los parámetros correspondientes al factor peligrosidad se tomarán de la Red Colombiana de Detección Total de Rayos (CTLDS), se analizará la peligrosidad en una ventana de tiempo de seis años comprendida entre 2012 y 2017.

Otro de los factores de Nivel I que influye en el riesgo es la **exposición**, término que se refiere al total de personas o bienes expuestos a un riesgo determinado así no ocurra un evento. La exposición se considera otro factor importante en el análisis de riesgo dado que la superpoblación, el hacinamiento de las grandes ciudades y la ocupación de áreas en peligro pueden provocar más daños que la propia peligrosidad del evento.

De manera particular, la exposición se puede calcular de acuerdo con la población potencialmente afectada (exposición social), los bienes expuestos al riesgo (exposición económica) y el número de especies afectadas o el grado de deterioro de los ecosistemas (exposición ecológica). En cualquier caso, el riesgo es mayor al aumentar la exposición y para disminuirlo o mitigarlo es importante colocar en práctica medidas preventivas y correctivas. En el presente trabajo, la exposición se calculará por medio de la densidad poblacional, la cual se refiere al número de habitantes por kilómetro cuadrado. Siendo así, se requiere conocer el área de las zonas bajo estudio que en este caso son las subregiones naturales y la población de estas.

Teniendo en cuenta que el DANE es la entidad encargada de suministrar la información de población se realizó la búsqueda por municipio y departamento, obteniendo así el número de personas residentes en Colombia (personas que viven por más de seis meses en un lugar). Luego, se procedió a consultar las coordenadas geográficas de cada municipio con el fin de importar la información a Global Mapper. De esta manera, se trabaja con la información actualizada y se atribuye a cada coordenada el nombre de la subregión natural.

En la Tabla 5.1 se muestra la población y el área de cada subregión natural entre los años 2012 y 2017. A partir de esta información, se calculó la densidad poblacional con ayuda de la Ecuación (5-1), y su comportamiento gráfico se evidencia en la Figura 5.1. En este caso, se tiene que las subregiones naturales con mayor densidad poblacional son el Altiplano Cundiboyacense (AC) y el Valle del Cauca (VC), las cuales representan una densidad poblacional del 40% y el 21% del país, respectivamente. Entre tanto, las demás subregiones naturales representan una densidad poblacional total de 39%, es decir, que cada una de ellas tiene una densidad poblacional del 2%.

$$Densidad\ Poblacional = \frac{Población}{Área} \rightarrow \left[\frac{Habitantes}{km^2}\right] \tag{5-1}$$

ESPACIO DEJADO EN BLANCO DE MANERA INTENCIONAL

Tabla 5.1 Población para cada subregión natural desde 2012 hasta 2017 en Colombia

SN	Área [km²]	Población [Habitantes]					
		2012	2013	2014	2015	2016	2017
AC	10.602	10.040.330	10.181.111	10.321.523	10.461.742	10.601.208	10.740.627
AP	5.099	640.184	646.338	652.629	658.855	665.403	671.729
AM	19.597	1.664.969	1.676.366	1.687.632	1.698.798	1.709.720	1.720.582
AZ	427.079	642.768	650.946	659.292	667.765	676.286	684.974
CT	6.289	862.737	872.720	882.753	892.845	903.015	913.130
LLC	93.905	8.978.527	9.098.135	9.218.659	9.339.712	9.462.441	9.585.211
LLCP	24.054	865.340	882.222	899.490	917.090	935.148	953.602
LLG	11.292	628.808	650.862	672.857	694.794	716.778	738.621
MC	59.356	2.890.265	2.902.238	2.914.228	2.926.236	2.938.466	2.950.505
MNE	53.700	2.598.758	2.608.427	2.618.063	2.627.564	2.637.195	2.646.697
MNOE	54.267	5.481.827	5.541.147	5.600.036	5.658.509	5.716.794	5.774.334
MS	66.982	2.387.029	2.412.620	2.438.332	2.464.161	2.490.370	2.516.484
OQ	172.422	310.022	314.735	319.453	324.224	328.952	333.731
PF	23.587	328.047	331.017	333.988	337.008	339.989	343.039
PA	18.434	193.893	194.834	195.812	196.808	197.842	198.902
PLL	22.931	1.111.574	1.133.063	1.154.659	1.176.277	1.198.061	1.219.821
SB	16.453	138.635	140.153	141.716	143.326	144.936	146.602
SN	12.820	491.346	499.680	508.175	516.848	525.723	534.795
VC	10.976	5.409.110	5.457.414	5.505.810	5.554.457	5.603.182	5.652.145
VMM	35.107	797.380	805.206	813.196	821.235	829.318	837.451

Fuente: Autora

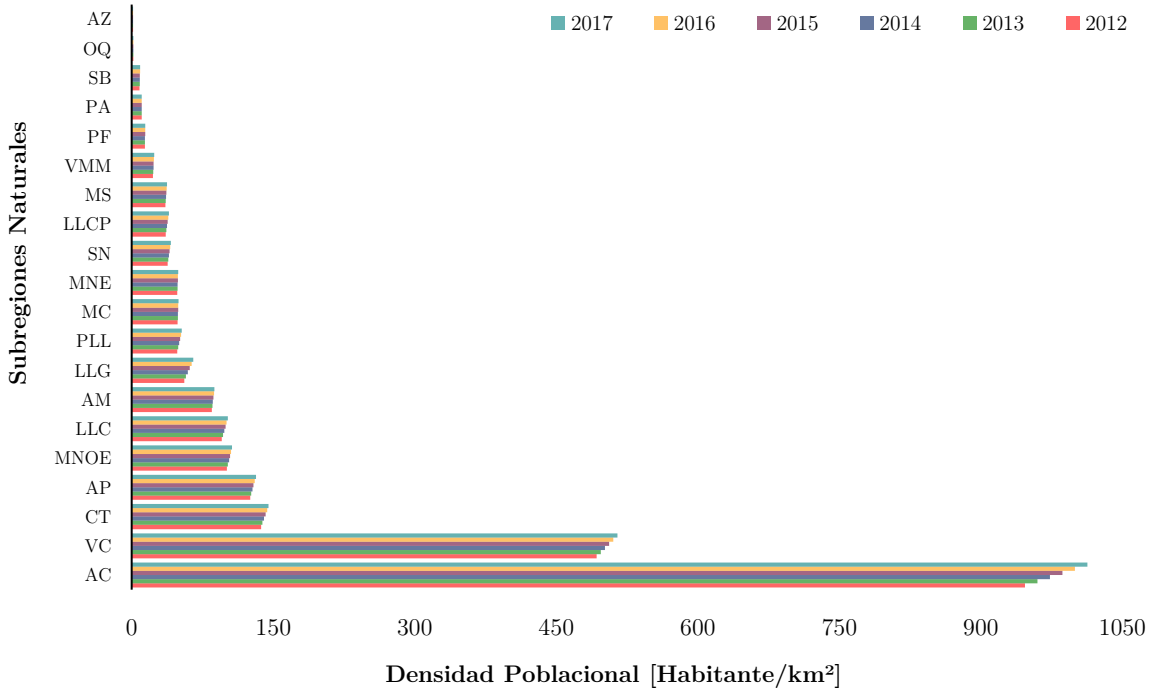


Figura 5.1 Densidad poblacional desde 2012 hasta 2017 en las subregiones naturales de Colombia
Fuente: Autora

El último factor que se evalúa en el riesgo es la **vulnerabilidad** definida por la Real Academia Española (RAE) como el poder de ser herido o recibir una lesión, física o moralmente. Sin embargo, en la literatura se encuentran diferentes conceptos tales como:

- *"Grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos en riesgo resultado de la probable ocurrencia de un suceso desastroso, expresada en una escala de 0 (sin daño) a 1 (pérdida total)"* [50].
- *"Características de una o varias personas desde el punto de vista de su capacidad para anticipar, sobrevivir, resistir y recuperarse del impacto de una amenaza natural"* [51].
- *"Conjunto de condiciones ambientales, sociales, económicas, políticas y educativas que hacen que una comunidad estés más o menos expuesta a un desastre, sea por las condiciones inseguras existentes o por su capacidad para responder o recuperarse ante tales desastres"* [29].

De acuerdo con la variedad de definiciones, la vulnerabilidad involucra una combinación de factores que determinan el grado hasta el cual la vida de un individuo queda en riesgo a causa de un evento provocado por la naturaleza o la sociedad. La vulnerabilidad no existe si una persona o un elemento no se encuentra amenazado, es decir, si no hay amenaza, no es factible ser vulnerable. Por otra parte, una condición de amenaza existe cuando una comunidad o equipos se encuentran expuestos.

En este punto es importante mencionar que existen comunidades que son más vulnerables que otras al daño y/o pérdida provocado por un fenómeno o evento [52]. Esto se debe a que en una comunidad la vulnerabilidad varía continuamente debido al crecimiento de la población, construcción de viviendas, carreteras y otras infraestructuras. Adicionalmente, dentro de la vulnerabilidad se presentan dimensiones determinadas por causas estructurales, procesos sociales y condiciones inseguras, tal y como se muestra en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2 Dimensiones de la vulnerabilidad

Dimensión	Aspectos clave	Factores relacionados
Estructural	Ideologías, estructura de poder o sistemas económicos	Conciencia ciudadana, desigualdad social, modelo económico, acceso a los servicios de salud y saneamiento, acceso a la educación, acceso a la vivienda.
Dinámica social	Procesos de urbanización y políticas educativas o ambientales	Niveles de pobreza existentes, características y cobertura de los servicios, desarrollo de organizaciones e instituciones.
Condiciones de inseguridad	Físicos	Ubicación en áreas y zonas peligrosas, características de las construcciones de vivienda, carreteras, infraestructura social y productiva con relación a las distintas amenazas.
	Culturales	Acceso rápido a la información y comunicación.
	Institucionales	Capacidad de respuesta de las institucionales responsables.

Fuente: Tomado de [29]

A partir de lo expuesto previamente, se definió la **vulnerabilidad** como la proporción de casos causados por un suceso (en este caso los rayos) respecto al total expuesto. Esta definición se expresa matemáticamente en la Ecuación (5-2) y los resultados de su aplicación se muestran en la

Tabla ***5.3***.

$$Vulnerabilidad = \frac{No.Casos}{Exposición} \rightarrow \left[\frac{Víctimas}{Habitantes}\right] \tag{5-2}$$

Tabla 5.3 Vulnerabilidad: tanto por uno de pérdidas respecto al total expuesto

SN	2012	2013	2014	2015	2016	2017
AC	2.99×10^{-7}	7.74×10^{-6}	0	2.24×10^{-6}	0	3.39×10^{-7}
AP	7.81×10^{-6}	1.79×10^{-6}	1.52×10^{-6}	8.57×10^{-7}	0	2.64×10^{-6}
AM	6.01×10^{-7}	9.22×10^{-6}	1.13×10^{-6}	0	6.81×10^{-7}	1.73×10^{-7}
AZ	3.11×10^{-6}	0	1.19×10^{-6}	0	1.14×10^{-6}	1.99×10^{-6}
CT	0	1.32×10^{-6}	0	1.37×10^{-6}	2.27×10^{-6}	0
LLC	1.89×10^{-6}	0	0	1.14×10^{-6}	8.03×10^{-7}	2.92×10^{-6}
LLCP	1.16×10^{-6}	0	2.06×10^{-6}	1.24×10^{-6}	3.04×10^{-6}	0
LLG	1.59×10^{-6}	2.76×10^{-6}	2.67×10^{-6}	8.12×10^{-7}	0	0
MC	1.04×10^{-6}	1.15×10^{-6}	2.32×10^{-6}	1.23×10^{-5}	0	0
MNE	2.31×10^{-6}	1.44×10^{-6}	1.23×10^{-6}	0	8.35×10^{-7}	0
MNOE	7.30×10^{-7}	1.24×10^{-6}	0	5.08×10^{-6}	0	7.08×10^{-7}
MS	8.38×10^{-7}	9.53×10^{-6}	0	0	0	1.19×10^{-6}
OQ	1.29×10^{-5}	0	0	0	7.14×10^{-7}	0
PF	0	0	8.66×10^{-7}	0	1.21×10^{-6}	0
PA	5.16×10^{-6}	0	0	5.40×10^{-7}	0	0
PLL	0	0	2.16×10^{-5}	4.87×10^{-6}	0	0
SB	7.21×10^{-6}	0	3.63×10^{-7}	0	1.19×10^{-5}	0
SN	0	1.10×10^{-6}	0	0	2.79×10^{-7}	0
VC	2.03×10^{-6}	0	0	1.20×10^{-5}	1.19×10^{-5}	0
VMM	3.76×10^{-6}	0	0	9.43×10^{-8}	0	0

Fuente: Autora

Los valores de vulnerabilidad presentados en la
Tabla ***5.3*** se expresan en forma de probabilidad, es decir, que se expresan como el tanto por uno de pérdidas (víctimas mortales) respecto al total expuesto (población de la subregión). De acuerdo con esto, para el periodo analizado se observan subregiones como la Orinoquía (OQ), Pacífico (PF), Piedemonte Amazónico (PA), Piedemonte Llanero (PLL), Sierra Nevada (SN) y Valle Magdalena Medio (VMM) que poseen cuatro o más años con una vulnerabilidad igual a cero. Esto coincide con los años en que no se registraron víctimas mortales en dichas subregiones.

5.2 Modelo para la estimación del riesgo por rayos

En primera instancia, el riesgo está definido en la literatura [28], [53] como el producto entre la vulnerabilidad, la exposición y la peligrosidad, tal y como se muestra en la Ecuación (5-3).

$$R = P * V * E$$
$$P = DS * TR * GP \tag{5-3}$$

Donde, R es el Riesgo, P es la Peligrosidad, V es la Vulnerabilidad y E es la Exposición. Adicionalmente, la peligrosidad está compuesta por la Distribución del Suceso (DS), el Tiempo de Retorno (TR) y el Grado de Peligrosidad (GP). Teniendo en cuenta la Ecuación (5-3) y lo expuesto en la sección 5, donde

se establece una relación entre varios parámetros del rayo y los factores que inciden en el riesgo, la Ecuación (5-4) presenta los factores que inciden en el riesgo por rayos. Esta fórmula permitirá tener una primera aproximación de este tipo de riesgo.

$$RR = P * V * E$$
$$P = DDT * NC * S \tag{5-4}$$

En este caso, RR es el Riesgo por Rayos, mientras la peligrosidad está compuesta por la Densidad de Descargas a Tierra (DDT) dada en [flash/km^2-año], el Nivel Ceráunico (NC) expresado en [días de tormenta/año] y la Severidad (S) cuyas unidades serán [flash/minuto]. Cabe mencionar que el factor exposición (E), dado en [Habitantes/km^2], por lo general, hace referencia a la población de la zona a evaluar. De modo que es poco probable que este factor tenga cambios significativos entre estudios, mientras que los factores de peligrosidad y vulnerabilidad, debido a su interpretación, pueden variar de acuerdo al tipo de estudio que se esté realizando.

Debido a que los factores para calcular el riesgo por rayos tienen diferentes unidades, en este trabajo se propondrán tres escenarios matemáticos que tienen como propósito observar el comportamiento del riesgo. A continuación, se explicarán cada uno de los escenarios y de qué manera se usó la fórmula de riesgo, aunque es importante resaltar que en cada caso siempre se tendrá como base la Ecuación (5-4).

5.2.1 Escenario 1: producto de factores

El *primer escenario* se basa en calcular el riesgo como el producto de los tres factores (peligrosidad, vulnerabilidad y exposición), incluyendo las unidades presentadas en la Ecuación (5-4). A partir de dicho producto se procede a determinar las unidades que mejor describen el riesgo por rayos. Sin embargo, en el momento de llevar a cabo este análisis, se encontró que los factores que inciden en el riesgo por rayos pueden expresarse con diferentes unidades. La selección de estas unidades dependerá de la perspectiva y el uso que se le dé a cada uno de los factores analizados. Por esta razón, se proponen cuatro pruebas o alternativas en las cuales se combinan de manera diferente las unidades de los factores de riesgo.

La primera prueba consiste en colocar directamente las unidades de cada factor en la Ecuación (5-4) y solo hacer una conversión de días a minutos en el NC. Esta expresión se muestra en la Ecuación (5-5). Es importante anotar que en esta ecuación las unidades de cada parámetro, o del riesgo en general, están entre corchetes cuadrados, mientras las magnitudes de los factores serán identificadas con su sigla (por ejemplo: DDT o NC).

$$RR = \underbrace{\boxed{\left(DDT\left[\frac{flash}{km^2 * año}\right]\right) * \left(NC\left[\frac{días}{año}\right]\right) * \left(S\left[\frac{flash}{minuto}\right]\right)}}_{\text{Peligrosidad}} * \underbrace{\boxed{\left(E\left[\frac{habitantes}{km^2}\right]\right)}}_{\text{Exposición}} * \underbrace{\boxed{\left(V\left[\frac{víctimas}{habitantes}\right]\right)}}_{\text{Vulnerabilidad}} \tag{5-5}$$

$$RR = DDT * NC(1440) * S * E * V \quad \left[\frac{flash^2 * habitantes}{km^4 * año^2}\right]$$

Cabe mencionar que el factor de vulnerabilidad (V) se trabajó como la razón entre el número de eventos registrados (en habitantes) y la población de cada una de las subregiones naturales (en habitantes), por

esta razón, no tiene unidades. A partir de esta prueba, se considera que el riesgo calculado con la prueba N° 1 estará medido en función de una cantidad de habitantes expuestos ante condiciones peligrosas.

Teniendo en cuenta que los todos los eventos suceden bajo ciertas condiciones de peligrosidad, en la segunda prueba se calcula el riesgo por rayos de cada una de las subregiones por año incluyendo la tasa de mortalidad para Colombia (TM_C) y teniendo como base las condiciones de peligrosidad (DDT_C, NC_C, S_C) y exposición (E_C) obtenidas para todo el país. De esta manera, la expresión empleada es la mostrada en la Ecuación (5-6). En esta prueba no se tiene en cuenta la vulnerabilidad debido a que se trabaja con la tasa de mortalidad calculada para Colombia, de manera que las unidades del riesgo por rayos serán las mismas de la tasa de mortalidad, es decir, muertes por millón de habitantes año.

$$RR = \frac{\left(TM_C \frac{muertes}{millón\ habitante\ año}\right)\left(DDT_R \frac{flash}{km^2 * año}\right) * \left(NC_R \frac{días}{año}\right) * \left(S_R \frac{flash}{minuto}\right) * \left(E_R \frac{habitantes}{km^2}\right)}{\left(DDT_C \frac{flash}{km^2 * año}\right) * \left(NC_C \frac{días}{año}\right) * \left(S_C \frac{flash}{minuto}\right) * \left(E_C \frac{habitantes}{km^2}\right)} \tag{5-6}$$

$$RR = \left(TM_C * \frac{DDT_R}{DDT_C} * \frac{NC_R}{NC_C} * \frac{S_R}{S_C} * \frac{E_R}{E_C} * V\right) \left[\frac{muertes}{millón\ habitante\ año}\right]$$

La tercera y cuarta prueba consisten en tomar los factores de cada una de las subregiones naturales (identificados con el subíndice R) y dividirlos sobre los factores generales obtenidos para Colombia (subíndice C) y sobre los factores máximos encontrados en el año bajo estudio (subíndice $Máx$), respectivamente. El riesgo calculado con estas pruebas no posee unidades y se calculó como se muestra en la Ecuación (5-7) y en la Ecuación (5-8).

$$RR = \frac{\left(DDT_R \frac{flash}{km^2 * año}\right) * \left(NC_R \frac{días}{año}\right) * \left(S_R \frac{flash}{minuto}\right) * \left(E_R \frac{habitantes}{km^2}\right) * V_R}{\left(DDT_C \frac{flash}{km^2 * año}\right) * \left(NC_C \frac{días}{año}\right) * \left(S_C \frac{flash}{minuto}\right) * \left(E_C \frac{habitantes}{km^2}\right) * V_C} \tag{5-7}$$

$$RR = \frac{\left(DDT_R \frac{flash}{km^2 * año}\right) * \left(NC_R \frac{días}{año}\right) * \left(S_R \frac{flash}{minuto}\right) * \left(E_R \frac{habitantes}{km^2}\right) * V_R}{\left(DDT_{Máx} \frac{flash}{km^2 * año}\right) * \left(NC_{Máx} \frac{días}{año}\right) * \left(S_{Máx} \frac{flash}{minuto}\right) * \left(E_{Máx} \frac{habitantes}{km^2}\right) * V_{Máx}} \tag{5-8}$$

5.2.2 Escenario 2: producto en por unidad sumando los factores de peligrosidad

En el *segundo escenario* se multiplican los factores de riesgo normalizados tomando los datos de cada subregión y dividiéndolos con respecto al valor máximo encontrado para el año bajo estudio. La diferencia con respecto a la prueba 4 del escenario 1 es que, en este caso, los factores de Nivel II que corresponden a la peligrosidad (DDT, NC y S) se suman de manera independiente y el resultado se multiplica con los valores normalizados de la exposición y la vulnerabilidad (factores de Nivel I). La expresión matemática de este escenario se muestra en la Ecuación (5-9) y el riesgo calculado no tiene unidades.

$$RR = [DDT + NC + S] * V * E$$

$$RR = \left[\left(\frac{DDT_R}{DDT_{Máx}}\right) + \left(\frac{NC_R}{NC_{Máx}}\right) + \left(\frac{S_R}{S_{Máx}}\right)\right] * \left(\frac{E_R}{E_{Máx}}\right) * \left(\frac{V_R}{V_{Máx}}\right) \tag{5-9}$$

ESPACIO DEJADO EN BLANCO DE MANERA INTENCIONAL

5.2.3 Escenario 3: sumatoria en por unidad

El *tercer escenario* para evaluar el riesgo consiste en sumar los factores de riesgo de Nivel I y los de Nivel II normalizados. Dicha normalización se hace aplicando el mismo método descrito en el escenario 2. La expresión de riesgo para este escenario se muestra en la Ecuación (5-10) y su resultado no tiene unidades. En este caso cada factor de riesgo se multiplica por una constante de ponderación (k_i), la cual asigna un peso (porcentaje) dentro de la Ecuación. La suma de estas constantes siempre debe ser uno (100%).

$$RR = k_{DDT}\left(\frac{DDT_R}{DDT_{Máx}}\right) + k_{NC}\left(\frac{NC_R}{NC_{Máx}}\right) + k_{TS}\left(\frac{S_R}{S_{Máx}}\right) + k_E\left(\frac{E_R}{E_{Máx}}\right) + k_V\left(\frac{V_R}{V_{Máx}}\right) \tag{5-10}$$

Este escenario se propuso teniendo en cuenta que los escenarios 1 y 2 se basan en el producto de los tres factores de Nivel I, pero si alguno de estos es cero, el riesgo será cero. En este sentido, el escenario 3 soporta una hipótesis bajo la cual, aunque no haya reportes de defunciones en una subregión (vulnerabilidad cero), no se puede afirmar que el riesgo es cero dado que los factores de peligrosidad (DDT, NS y S) estarán presentes en los días de lluvias.

En cuanto a las constantes de ponderación (k_i), estas se pueden asignar libremente. No obstante, en este trabajo se proponen varias pruebas considerando diferentes porcentajes para cada uno de los factores de riesgo de Nivel I y Nivel II, tal y como se observa en la Tabla 5.4. De acuerdo con esta tabla, las pruebas 1, 2 y 3 consideran factores con pesos diferentes, mientras la prueba 4 asume el mismo peso para todos los factores de riesgo.

Revisando la Tabla 5.4, en la prueba 1 se está dando un peso del 33.3% a cada uno de los factores de Nivel I y, en el caso de la peligrosidad, se da un peso del 11% para los factores de Nivel II. En las pruebas 2 y 3, el mayor peso lo tiene la peligrosidad con un total del 50% y el 50% restante se reparte entre la exposición y la vulnerabilidad. Sin embargo, en el caso de la prueba 2 se reparte en partes iguales, mientras que en la prueba 3 la exposición tiene un 30% y la vulnerabilidad un 20%. Finalmente, en la prueba 4 se tiene un 20% en cada factor, aunque si se observa de manera global la ecuación, la peligrosidad se sigue llevando el mayor porcentaje con un total del 60%.

Tabla 5.4 Peso porcentual para cada uno de los factores de Nivel I y Nivel II

Parámetro		Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4
Peligrosidad	$DDT: k_{DDT}$	11.1%	20%	20%	20%
	$NC: k_{NC}$	11.1%	10%	10%	20%
	$S: k_{TS}$	11.1%	20%	20%	20%
Exposición	k_E	33.3%	25%	30%	20%
Vulnerabilidad	k_V	33.3%	25%	20%	20%
	TOTAL	**100%**	**100%**	**100%**	**100%**

Fuente: Autora

Teniendo en cuenta los tres escenarios descritos, los resultados de su aplicación se presentarán en el Capítulo 6.

6 Evaluación del riesgo por rayos en Colombia

6.1 Riesgo tolerable por rayos

En la sección 2.3 se mencionó que existen dos maneras de medir el riesgo: la primera, es a partir del método cualitativo donde se pueden determinar los criterios de admisibilidad (principio ALARP), y el segundo método, es hacer un análisis cuantitativo por medio de curvas F-N, las cuales se basan en el concepto del principio ALARP que en español significa *"tan bajo como sea razonablemente práctico"* [32].

Dentro de las curvas F-N y el principio ALARP se encuentra acotado el término de *riesgo tolerable*, el cual indica que el riesgo se ha reducido a un nivel que puede ser asumido, y en el cual, se deben dar soluciones que no tengan una carga económica importante. Por tanto, en el *riesgo tolerable* se debe realizar un análisis donde se tienen en cuenta criterios como costo, riesgo y beneficio. De esta manera, el análisis de riesgo conlleva a una metodología que permite establecer una combinación óptima entre los costos y los beneficios que se generan a partir de la implementación de una mejora. Además, es importante considerar el riesgo que implica la implementación de la mejora que se está analizando.

Por tanto, las curvas F-N ilustran el nivel de riesgo al que se encuentra expuesta una población por medio de una curva que relaciona la frecuencia de ocurrencia del accidente (F) y el número de víctimas (N). Algunas de las ventajas que se tienen al usar este tipo de curva es que se pueden comparar distintos riesgos y se puede visualizar el nivel de riesgo actual al que se está expuesto. Por el contrario, las desventajas que se presentan al usar las curvas F-N es que la medición se hace en términos de número de personas afectadas, pero no se puede determinar el grado de daño que haya sufrido la persona. Adicionalmente, se requiere de un periodo de tiempo largo (varios años) para medir, ya sea, un solo tipo de riesgo o diferentes tipos de riesgo para poder realizar la comparación [31]. Aunque si se cuenta con la suficiente información, construir la curva F-N será más fácil y se podrá visualizar mejor el resultado.

Como se mencionó en el párrafo anterior, para la elaboración de la curva F-N se requiere únicamente la información del número de víctimas y la frecuencia de ocurrencia. En este sentido, para la elaboración de las curvas F-N se usará la información de las estadísticas de mortalidad por rayos reportadas por el Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE), la cual fue presentada y analizada en el capítulo 3. Dicha información tiene una ventana de tiempo de 21 años comprendida entre el año 1997 hasta el 2017. Luego de tener la información recopilada, y de acuerdo con lo que se encuentra en la literatura, en el eje X de la curva se graficará el número de víctimas y en el eje Y la frecuencia de ocurrencia [54]–[63]. Adicionalmente, se deben definir las zonas aceptables e inaceptables, las cuales en este trabajo serán las que se encuentran en la norma NTC 4552-2 [30].

Siguiendo cada uno de los pasos mencionados se construyó la curva F-N para toda Colombia en el periodo comprendido entre 1997 y 2017. Según los datos analizados, el 89 % de los casos reportó una muerte a causa de rayos, mientras que en dos casos se reportó la muerte de 5 y 11 personas, respectivamente, representado así el 0,1 % de las muestras analizadas. En la Tabla 6.1 se observan los

casos, el número de eventos por cada caso y el total de muertes de los 21 años. Luego, se procedió a calcular la frecuencia por año y la frecuencia acumulada por año.

Tabla 6.1 Datos de la Curva F-N para analizar el riesgo por rayos en Colombia

Casos	Eventos	Muertes	Frecuencia por año	Frecuencia Acumulada por año
11	1	11	5.96×10^{-10}	5.96×10^{-10}
5	1	5	2.71×10^{-10}	8.67×10^{-10}
4	2	8	4.33×10^{-10}	1.30×10^{-9}
3	21	63	3.41×10^{-9}	4.71×10^{-9}
2	92	184	9.97×10^{-9}	1.47×10^{-8}
1	1042	1042	5.64×10^{-8}	7.11×10^{-8}
Total	**1159**	**1313**		

Fuente: Autora

A partir de la información registrada en la Tabla 6.1 se graficó en la Figura 6.1 la curva F-N correspondiente al riesgo tolerable por rayos en Colombia (línea azul). En esta figura se observa que la curva se encuentra dentro del límite aceptable (línea verde). Sin embargo, es importante resaltar que los límites aceptable (línea verde) e inaceptable (línea roja) de riesgo tolerable, incluidos en este trabajo y tomados de la norma NTC 4552, corresponden a límites establecidos por estándares internacionales. Por lo tanto, uno de los trabajos que se propone en un futuro cercano es el desarrollo de un estudio en el cual se determinen los nuevos límites de aceptabilidad e inaceptabilidad de riesgo por rayos teniendo en cuenta las condiciones geográficas de Colombia.

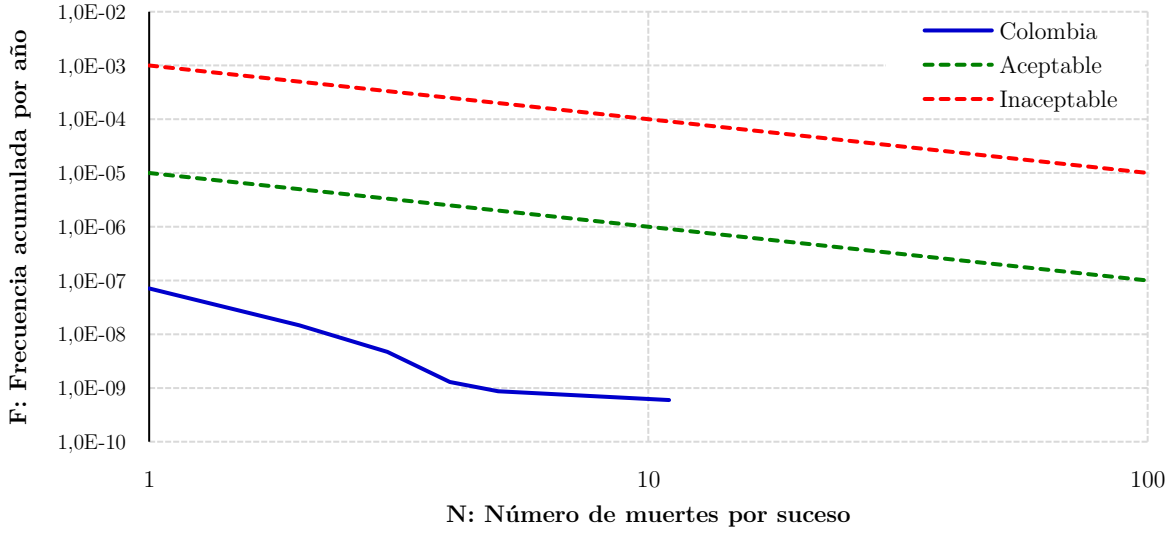


Figura 6.1 Curva F-N del riesgo por rayos
Fuente: Autora

Adicionalmente, en el Anexo B se observan las curvas F-N por subregión natural, las cuales se encuentran dentro del límite aceptable. Algunas de las curvas presentan mayor cantidad de información, lo cual permite identificar las subregiones naturales que poseen la mayor cantidad de casos de muertes por rayos.

6.2 Riesgo general por rayos

En esta sección se presentan y analizan los resultados obtenidos luego de aplicar las diversas expresiones matemáticas, propuestas en la sección 5.2, para calcular el riesgo por rayos a partir de la estimación de los factores de riesgo (peligrosidad, exposición y vulnerabilidad) para cada subregión de Colombia.

6.2.1 Escenario 1: producto de factores

A partir de las pruebas realizadas en el primer escenario, se seleccionó la expresión matemática presentada en la Ecuación (5-8), la cual toma los factores de cada una de las subregiones naturales y los divide sobre los factores máximos encontrados en el año bajo estudio (prueba N° 4). Esta definición de riesgo se escogió toda vez que permite obtener la probabilidad de riesgo por rayos en cada una de las subregiones naturales para cada año bajo estudio y sus resultados no poseen unidades, lo cual permite comparar este escenario con lo obtenido en los escenarios 2 y 3.

De este modo, en la Figura 6.2 se observa que las subregiones de la Llanura Caribe (LLC) y la Montaña Noroeste (MNOE) presentaron el riesgo anual más alto con unos valores de $8{,}42x10^{-3}$ en 2012 y $8{,}38x10^{-3}$ en 2016, respectivamente. En estas regiones el riesgo promedio multianual fue $3x10^{-3}$ para la LLC y $4{,}4x10^{-3}$ para la MNOE. Otras subregiones como el Altiplano de Popayán (AP), Valle del Magdalena Medio (VMM) y Valle del Cauca (VC) presentaron un alto riesgo con un promedio multianual de $2{,}8x10^{-3}$, $1{,}9x10^{-3}$ y $1{,}6x10^{-3}$, respectivamente.

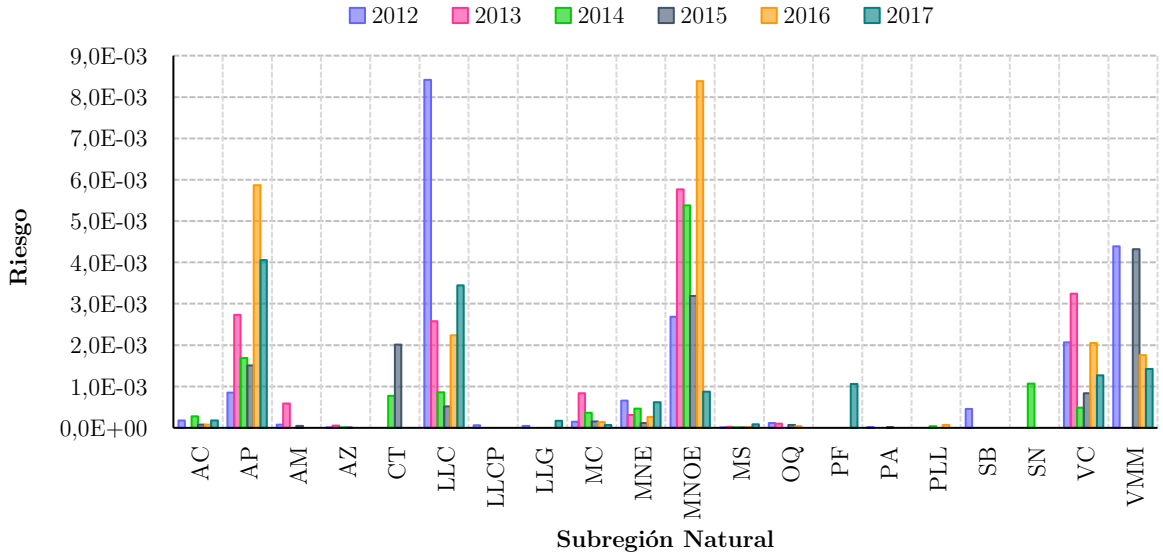


Figura 6.2 Riesgo por rayos obtenido en el Escenario 1 (prueba 4)
Fuente: Autora

6.2.2 Escenario 2: producto en por unidad sumando los factores de peligrosidad

Los resultados de riesgo por rayos obtenidos a partir de la Ecuación (5-9) se muestran en la Figura 6.3. Analizando los resultados se encontró que el riesgo más alto en promedio (promedio multianual) se presentó en las subregiones del Altiplano Cundiboyacense (AC) con $7.72x10^{-2}$, el Valle del Cauca (VC)

con $9.77x10^{-2}$, la Llanura Caribe (LLC) con $5.95x10^{-2}$ y la Montaña Noroeste con $5.08x10^{-2}$. Durante las pruebas realizadas en este escenario se evidenció que la exposición es el factor que más influye en la ecuación de riesgo por rayos. Esta afirmación se puede hacer ya que las subregiones del Altiplano Cundiboyacense (AC) y Valle del Cauca (VC) presentaron el riesgo más alto debido a su alta densidad poblacional, la cual fue de $947\ habitantes/km^2$ y $493\ habitantes/km^2$, respectivamente.

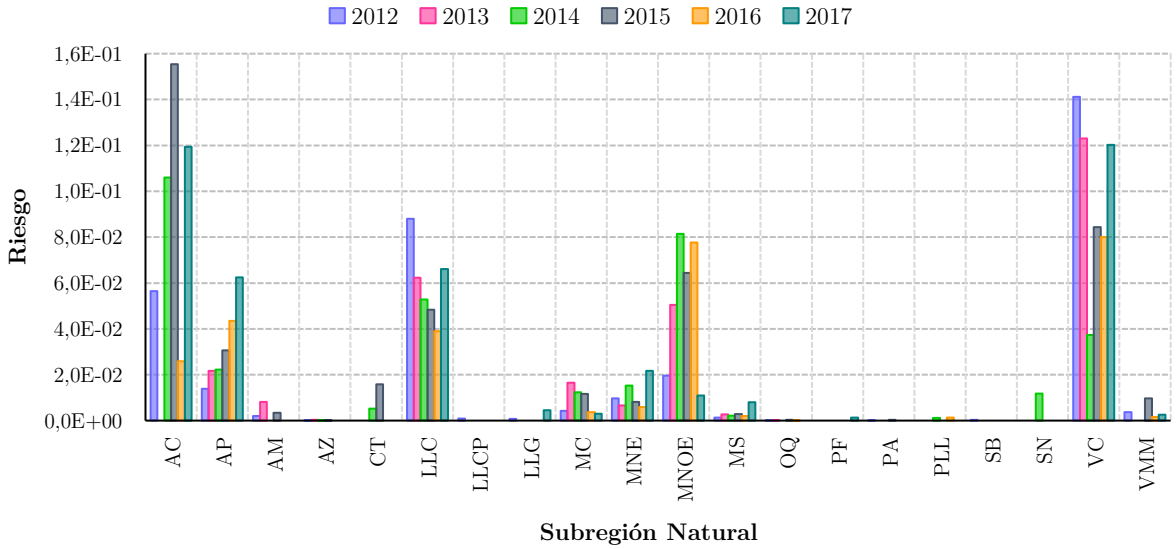


Figura 6.3 Riesgo por rayos obtenido en el Escenario 2
Fuente: Autora

6.2.3 Escenario 3: sumatoria en por unidad

En este escenario se empleó la Ecuación (5-10) dando un peso porcentual (constantes de ponderación k_i) de 20% a cada uno de los factores que inciden en el riesgo por rayos (DDT, NC, S, exposición y vulnerabilidad). En resumen, se aplicó la ponderación de la prueba 4, la cual fue descrita en la Tabla 5.4. Esta prueba se seleccionó con el propósito de darle mayor importancia al factor peligrosidad debido a que una tormenta eléctrica y la ocurrencia de rayos se puede presentar en cualquier momento.

La Figura 6.4 muestra los resultados de aplicación del escenario 3 y se observa que, aunque no se hayan presentado eventos de defunciones (vulnerabilidad cero) en algunas subregiones, el riesgo por rayos siempre está presente debido a la cantidad de personas expuestas y a la actividad de rayos que se presente en la zona bajo estudio. En este sentido, la Llanura Caribe (LLC) reportó el riesgo más alto durante el periodo de observación con valores de 0,61 y 0,57 en los años 2012 y 2017, respectivamente. Por su parte, la región del Valle del Magdalena Medio (VMM) presentó el mayor riesgo entre 2013 y 2016 con valores que oscilan entre 0,41 y 0,53.

Estos resultados, y en general todos los valores de riesgo calculados en el escenario 3, permiten recordar dos de las relaciones que se mencionaron en la sección 2.3: *"a más daño, más riesgo"* y *"a más gente implicada, mayor riesgo"*. De esta manera, se puede afirmar que, al aplicar la expresión matemática asociada a este escenario, siempre existirá riesgo por rayos, puesto que siempre se tendrán valores en los factores de exposición y peligrosidad.

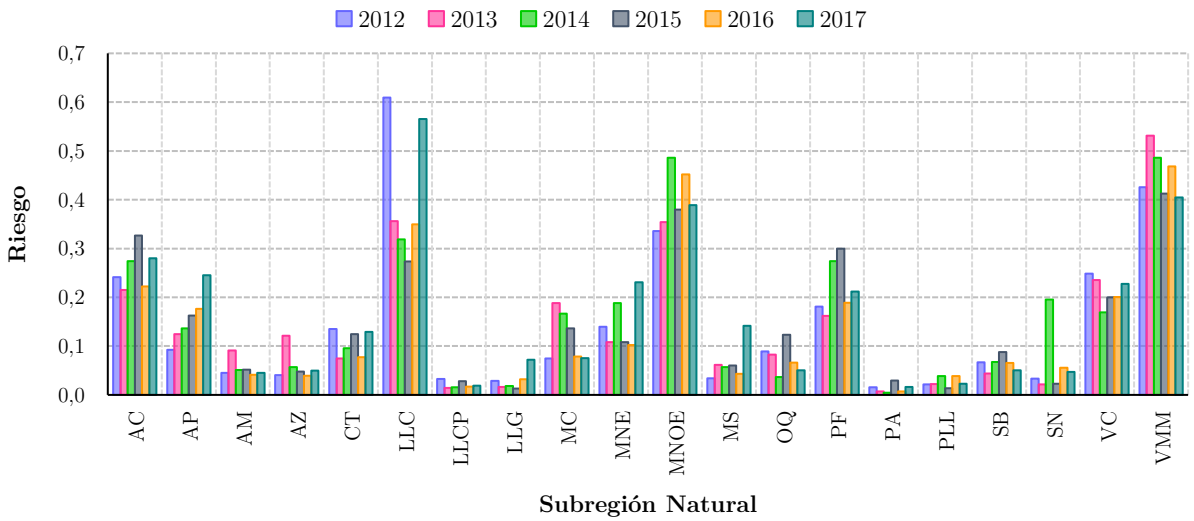


Figura 6.4 Riesgo por rayos obtenido en el Escenario 3 (prueba 4)
Fuente: Autora

6.2.4 Discusión

Luego de comparar y analizar los resultados obtenidos con los tres escenarios de fórmula de riesgo por rayos (planteadas en la sección 5.2 y aplicadas en la sección 6.2), se puede concluir que existen subregiones naturales de Colombia cuyo riesgo es alto sin importar la expresión matemática usada para su estimación. Es así como la Llanura Caribe (LLC), la Montaña Noroeste (MNOE), el Valle del Cauca (VC) y el Valle del Magdalena Medio (VMM), por lo general, siempre exhibieron los valores más altos (año-a-año o promedio multianual) de riesgo por rayos durante el periodo 2012-2017.

Por otra parte, de los resultados obtenidos en los tres escenarios, se puede considerar que la prueba 4 del escenario 1 es uno de los modelos que mejor se aproxima al cálculo del riesgo por rayos (cálculo de probabilidad). Al aplicar este escenario, usando la Ecuación (5-8), se observó que las subregiones naturales con mayor riesgo fueron la Llanura Caribe (LLC), la Montaña Noroeste (MNOE), el Altiplano de Popayán (AP), el Valle del Magdalena Medio (VMM) y el Valle del Cauca (VC). Estas subregiones coinciden con aquellas que también presentaron una alta mortalidad y, por ende, una alta tasa de mortalidad (ver Tabla 3.3). Esta correlación es importante si se tiene en cuenta que el modelo de riesgo se analizó para un periodo de tiempo de seis (6) años, mientras que los datos de mortalidad fueron obtenidos para una ventana de observación de veintiún (21) años.

Finalmente, a partir de los resultados obtenidos al aplicar la Ecuación (5-8), y a manera de ejemplo, se analizó el comportamiento del factor de peligrosidad para 2017 y se elaboró el mapa que se muestra en la Figura 6.5. Lo anterior, con el propósito de visualizar las subregiones naturales donde se presenta un mayor riesgo debido a los factores de Nivel II (DDT, NS y S). En este mapa se evidencia que para el año bajo estudio la mayor actividad de rayos en Colombia se presentó en las subregiones de la Llanura Caribe (LLC), Valle del Magdalena Medio (VMM), Montaña Noroeste (MNOE), Pacífico (PF) y Catatumbo (CT). Estos resultados, y su relación con las subregiones que poseen el mayor riesgo por rayos (ver Figura 6.2), confirman la importancia que posee el factor de peligrosidad en la aplicación del modelo de riesgo propuesto en el escenario 1.

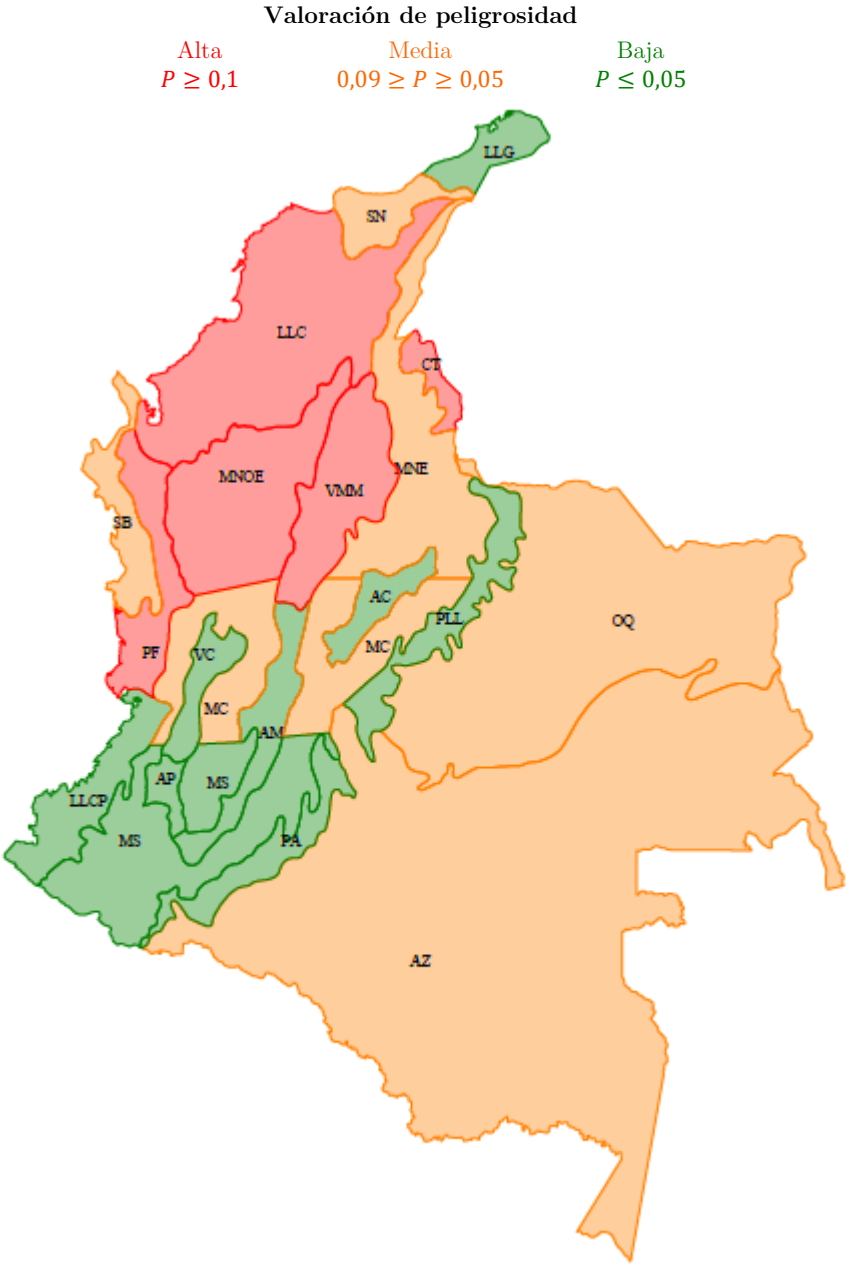


Figura 6.5 Mapa de peligrosidad para el año 2017
Fuente: Autora

ESPACIO DEJADO EN BLANCO DE MANERA INTENCIONAL

7 Conclusiones y trabajos futuros

7.1 Conclusiones

De acuerdo con los objetivos planteados, y el alcance del presente trabajo final de maestría, a continuación, se presentan las conclusiones de los resultados obtenidos a lo largo de la investigación realizada.

- En primera instancia, para identificar los principales factores que inciden en el riesgo por rayos se llevó a cabo una búsqueda sobre el concepto de riesgo que se ha trabajado a nivel global. De esta manera, se encontró que, en cualquier ámbito de estudio el riesgo se analiza, evalúa y calcula a partir de tres factores Nivel I: peligrosidad, exposición y vulnerabilidad. Cabe mencionar que, dentro del factor peligrosidad se encuentran tres factores Nivel II: distribución del suceso, tiempo de retorno o intervalo de recurrencia y grado de peligrosidad.

- Los factores de riesgo identificados fueron abordados y asociados al tema de riesgo por rayos en seres humanos. Es así como para este trabajo se concluyó que la peligrosidad está asociada a los parámetros del rayo, toda vez que este fenómeno natural afecta en muchas ocasiones la vida humana. De esta manera, los factores Nivel II que corresponden a la peligrosidad se asociaron a la Densidad de Descargas a Tierra (DDT), Nivel Ceráunico (NC) y Severidad (S). La exposición se asoció a la densidad poblacional y la vulnerabilidad a todos aquellos casos que fueron reportados como víctimas por rayos.

- Para evaluar el riesgo causado por rayos se aplicaron varias metodologías para determinar cuantitativamente los factores previamente identificados. En la primera metodología se definieron veinte subregiones naturales para las cuales se calculó el riesgo. En la segunda, se encontró para Colombia un total de 1313 muertes a causa de rayos para el periodo comprendido entre 1997 y 2017. Paralelo a este proceso, se obtuvo la población y densidad poblacional a nivel nacional y por subregiones, las cuales fueron importantes para obtener el factor exposición. La tercera metodología consistió en calcular la Densidad de Descargas a Tierra (DDT), el Nivel Ceráunico (NC) y la Severidad (S) para toda Colombia. La cuarta, y última metodología, hace referencia al planteamiento de la fórmula para la estimación del riesgo por rayos.

- De las 1313 muertes por rayos registradas se encontró que el 82% de los afectados fueron hombres y el 18% mujeres, casos que ocurrieron en áreas rurales y urbanas. En este sentido, la población rural es la mayor afectada con un 78% de casos, registrando en promedio 51 víctimas por rayos, mientras que para la población urbana (22% de los casos) se registraron en promedio 14 víctimas. Adicionalmente, el 39% de la población afectada se encontraba entre los 15 y 29 años. En términos generales, en un periodo de 21 años (1997-2017) se han registrado en promedio 63 víctimas por rayos en todo el territorio nacional.

- Respecto a un análisis global de mortalidad por rayos en Colombia, se identificó que los años en los cuales se sobrepasó el número de muertes promedio fueron 1999 (71), 2001 (66), 2003 (98), 2004 (85), 2005 (93), 2006 (66), 2008 (86), 2009 (79), 2012 (65) y 2014 (66). Sin embargo, se evidenció que a partir del año 2008 el comportamiento de la mortalidad por rayos en Colombia ha disminuido considerablemente. Esta tendencia decreciente en la mortalidad por rayos permite afirmar que los resultados de la investigación sobre rayos en el país desde hace más de 40 años, y socializada con la entrada de la norma NTC 4552 y del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE), han sido de gran valor para tomar medidas en lo que respecta a la protección contra rayos, y de esta forma, disminuir el riesgo por rayos en la sociedad colombiana.

- A partir del análisis temporal realizado se evidenció que los meses con mayor mortalidad por rayos son abril-mayo (22%) y septiembre-octubre (25%), los cuales coinciden con las temporadas de lluvias que se registran en el centro del país. De esta manera, se deben implementar las medidas correctivas para mitigar la mortalidad por rayos, tanto en los meses de lluvias fuertes, como en los demás meses.

- Luego de analizar la información obtenida de diversas fuentes, este trabajo presentó un mapa de mortalidad por rayos tanto para Colombia, como para cada una de las subregiones naturales estudiadas. A partir de este mapa se evidenció que el fenómeno del rayo afecta principalmente las poblaciones asentadas en las zonas montañosas del país.

- La tasa de mortalidad anual fue calculada para las subregiones naturales y para los departamentos de Colombia. A partir del análisis realizado se encontró que la cantidad de casos registrados influye directamente en el aumento o disminución de la tasa de mortalidad. De esta manera, la tasa de mortalidad que se encontró para toda Colombia fue de 1.42 muertes por millón habitante al año. Sin embargo, desde el año 2003 hasta el año 2005 se obtuvo una tasa de mortalidad superior a 2 muertes por millón habitante año, mientras en el año 2008 se registraron 86 casos y la tasa de mortalidad fue de 1.93 muertes por millón habitante año. La disminución de la tasa de mortalidad para los años 2003-2005 se debe a que la población de Colombia fue mayor y las muertes reportadas se mantuvieron constantes.

- Las subregiones naturales donde se encontró la mayor tasa de mortalidad fueron el Altiplano de Popayán (AP), la Orinoquía (OQ) y el Valle del Magdalena Medio siendo de 8.99, 4.65 y 3.34 muertes por millón habitante año, respectivamente. Por su parte, en las subregiones de la Amazonía (AZ), la Montaña Noreste (MNE), Pacífico (PF) y Sierra Nevada se obtuvo una tasa de mortalidad por encima de 2 muertes por millón habitante año. Aunque en la Llanura Caribe (LLC) se registró la mayor cantidad de muertes con 292 casos, se esperaba que la tasa de mortalidad fuera alta. No obstante, la alta población de esa subregión hizo que la tasa fuera de 1.65 muertes por millón habitante año.

- Además de la tasa de mortalidad por subregión, en este trabajo se estudió la tasa de mortalidad por departamento, encontrando valores de 9.64, 5.54, 5.25, 4.33 y 3.59 muertes por millón habitante, los cuales corresponden a los departamentos de Vichada, Cauca, Guainía, Guaviare y Vaupés, respectivamente. Entre tanto, departamentos como Córdoba, Caquetá, Boyacá, Magdalena y Arauca presentaron tasas de mortalidad entre 2.03 y 2.81 muertes por millón habitante año. En este sentido, aunque el departamento de Antioquia presentó la mayor cantidad de casos, al presentar una alta población, la tasa de mortalidad fue de 1.98 muertes por millón habitante año.

- A partir de la información suministrada por la red LINET® se tiene que los años con mayor y menor NC fueron 2017 (221 días) y 2014 (64 días), respectivamente. De manera particular, durante el año 2015 se registraron 296 días de tormenta en la subregión del Pacífico (PF), el cual fue el mayor registro de NC presentado entre 2012 y 2017. Por su parte, las subregiones naturales de la Montaña Noreste (MNE) y la Montaña Noroeste (MNOE) presentaron entre 264 y 280 días de tormentas al año, mientras la Llanura Guajira (LLG) y la Llanura Costera del Pacífico (LLCP) presentaron un NC entre 15 y 55 días de tormenta al año.

- Respecto a la DDT, el mayor valor promedio se presentó en la subregión del Pacífico (PF), la cual varió entre 29.8 y 57.6 rayos/km^2-año para el periodo comprendido entre 2014 y 2017. En los años 2012 y 2013 la subregión del Catatumbo y el Valle del Magdalena Medio presentaron el mayor valor promedio siendo de 40 y 32 rayos/km^2-año. Las subregiones donde se encontraron valores promedio de DDT por encima de 20 rayos/km^2-año fueron la Montaña Noroeste (MNOE), Pacífico (PF) y Valle del Magdalena Medio (VMM). Finalmente, con base en los valores encontrados para cada una de las subregiones naturales, se elaboró un mapa de DDT para toda Colombia. Este mapa es uno de los aportes más relevantes de este estudio.

- En este trabajo se consideró que el factor de riesgo asociado a la severidad (S) está dado a partir de una tormenta severa, la cual se establece cuando la tasa de flashes por minuto dentro de la tormenta fuese superior al percentil 95 (P_{95}). De esta manera, se observó a nivel nacional que una tormenta severa se presenta en promedio con más de 33 flashes por minuto. Adicionalmente, al analizar este factor se observó que los meses de mayor actividad de rayos son abril-mayo y septiembre-octubre, lo cual valida la temporada de lluvias intensas que se presenta en el país.

- A partir de la fórmula de riesgo definida en la literatura, este trabajo propone tres alternativas (modelos o escenarios) para calcular el riesgo por rayos: producto de factores, producto en por unidad sumando los factores de la peligrosidad y sumatoria en por unidad. Cada escenario proporciona un valor de acuerdo con las unidades que se obtuvieron para cada uno de los factores de riesgo (tanto Nivel I como Nivel II). En este sentido, el escenario 3 se propuso debido a que el riesgo no será cero cuando alguno de los factores de riesgo (peligrosidad, exposición o vulnerabilidad) sea cero. De esta forma, en este escenario siempre existirá un riesgo por muy bajo que sea.

- Luego de comparar los resultados obtenidos con los tres modelos matemáticos para calcular el riesgo por rayos se evidenció que, al hacer uso de cualquiera de las fórmulas, las subregiones naturales que presentaron un riesgo alto fueron la Llanura Caribe (LLC), Montaña Noroeste (MNOE), Valle del Cauca (VC) y Valle del Magdalena Medio (VMM).

- El riesgo tolerable debido a rayos en Colombia se calculó haciendo uso de las curvas F-N y se evidenció que el riesgo social en las subregiones naturales y, en general, en toda Colombia, se encuentra dentro del límite aceptable según el valor típico de riesgo tolerable registrado en la Norma Técnica Colombiana NTC 4552-2. Cabe aclarar que dicho valor se tomó del estándar internacional IEC 62305-2 y esta norma está basada en otras condiciones geográficas. Por lo tanto, uno de los trabajos futuros debe ser el desarrollo de un estudio en el cual se determine un nuevo valor típico de riesgo tolerable teniendo en cuenta las condiciones geográficas y la actividad de rayos en Colombia.

- A partir de un mapa de peligrosidad realizado para Colombia se evidenció que el parámetro que más incide en dicho factor es la DDT. Este mapa también permitió identificar las subregiones

naturales con mayor actividad de rayos y apreciar la correlación existente entre la peligrosidad, el riesgo por rayos y la mortalidad registrada a causa de este fenómeno natural.

- Finalmente, al abordar cada uno de los objetivos específicos y analizar la información obtenida se concluye que, para evaluar y analizar el riesgo en seres humanos causado por rayos en Colombia, de acuerdo con las condiciones fisiográficas y climatológicas, es necesario identificar y cuantificar la peligrosidad, la exposición y la vulnerabilidad del área de interés. Sin embargo, en caso de que se requiera evaluar el riesgo por rayos en un lugar inhabitado sólo se debe determinar y analizar el factor de la peligrosidad.

7.2 Trabajos futuros

Durante el desarrollo de este trabajo final de maestría se fueron generando algunas ideas que permiten complementar y dar continuidad al tema de riesgo por rayos en Colombia. Estos son los trabajos futuros más relevantes que se plantean al final de esta investigación:

- Elaborar un algoritmo que permita analizar los episodios de tormenta con mayor nivel de detalle (día, mes, año y región) y que dicha información se pueda comparar con otras variables climatológicas.
- En el momento que se analizó la información de la ventana de tiempo de 6 años, se identificó que se podrían tener resultados más detallados al tener una base de datos más amplia. Por lo tanto, se sugiere que cada uno de los factores que inciden en el riesgo por rayos se consolide mensualmente.
- Teniendo en cuenta los factores que inciden en el riesgo se sugiere incluir otros parámetros del rayo (como la magnitud o polaridad de la corriente) y también analizar las diferentes dimensiones de la vulnerabilidad (estructural, dinámica social y condiciones de inseguridad).
- Aunque para Colombia, y las subregiones naturales analizadas, el riesgo tolerable por rayos se encuentra dentro del límite aceptable según la NTC 4552-2, es necesario estimar los límites de la zona ALARP (aceptable y no aceptable) teniendo en cuenta las condiciones fisiográficas y climatológicas de Colombia.

Referencias

[1] H. Torres-Sánchez, *Protección contra rayos*. Bogotá D.C.: Instituto Colombiano de Normas Técnicas-ICONTEC, 2010.

[2] C. T. R. Wilson, "Investigations on lightning discharges and on the electric field of thunderstorms," *Philos. Trans. R. Soc. London*, vol. 221, pp. 73–115, 1920.

[3] H. Torres-Sánchez, *El rayo en el trópico - Certezas temporales de investigación sobre el fenómeno del rayo*, Universida. Bogotá D.C., 2015.

[4] J. Areitio Piedra, "Estudio de los rayos en el país Vasco y su relación con la precipitación," Universidad del país Vasco-Euskal Herriko Unibertsitatea, 2010.

[5] International Standard, *IEC 62793 Protection against lightning: Thunderstorm warning systems*. 2016, pp. 1–40.

[6] V. A. Rakov and M. A. Uman, *Lightning: Physics and effects*, Cambridge. New York, 2010.

[7] H. Torres-Sánchez, *El Rayo, Mitos, Leyendas, Ciencia y Tecnología*. Bogotá D.C., 2002.

[8] S. Visacro, A. Soares Jr, M. A. Schroeder, L. Cherchiglia, and V. J. de Sosa, "Statistical analysis of lightning current parameters : Measurements at Morro do Cachimbo Station," *Geophys. Res.*, vol. 109, pp. 1–11, 2004.

[9] M. A. Schroeder, "Electromagnetic Model for Decontamination of Current Waves from Lightning: Application to Measurements of Morro do Cachimbo Station," University of Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

[10] F. J. Whipple, "On the association of the diurnal variation of electric potential in the weather with the distribution of thunderstorm over the globe," *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, vol. 55, no. 229, pp. 1 – 18, 2007.

[11] C. E. Pelham Brooks, *The Distribution of Thunderstorms over the Globe*, vol. 3. H. M. Stationery Office, 1925.

[12] V. A. Rakov, "Lightning: Phenomenology and parameters important for EMC," in *IX International Symposium on Lightning Protection*, 2006, no. November, pp. 283–288.

[13] M. A. Cooper, "Electrical and Lightning Injuries," *Trauma Reports*, vol. 17, no. 2, 2006.

[14] Dehn, S. GmbH, and Co.KG, *Lightning Protection Guide*, 3rd ed. Brandenburgo Oriental, Alemania, 2014.

[15] R. L. Holle, "The Number of Documented Global Lightning Fatalities," in *International Conference on Lightning Protection (ICLP 2016)*, 2016, pp. 1–4.

[16] M. Doljinsuren and C. Gomes, "Lightning related human casualties in Mongolia," in *International Conference on Lightning Protection (ICLP 2016)*, 2016, pp. 1–4.

[17] A. R. Syakura, M. Z. A. Ab-Kadir, C. Gomes, M. Izadi, A. B. Elistina, and M. A. Cooper, "Comparative Study on Lightning Fatality Rate in Malaysia between 2008 and 2017," in *International Conference on Lightning Protection (ICLP 2018)*, 2018.

[18] C. Gomes and M. Z. A. A. Kadir, "A theoretical approach to estimate the annual lightning hazards on human beings," *Atmos. Res.*, vol. 101, no. 3, pp. 719–725, 2011.

[19] R. L. Holle, "Lightning-caused Deaths and Injuries Related to Agriculture," in *International Conference on Lightning Protection (ICLP 2016)*, 2016, pp. 1–6.

[20] K. P. Naccarato and O. Pinto Jr, "Lightning warning and analysis of lightning threats risks for human life protection in Brazil.," in *International Conference on Lightning Protection (ICLP 2012)*, 2012, pp. 1–10.

[21] K. P. Naccarato, O. Pinto Jr, I. Pinto, A. M. Siqueira, and L. H. Alonso, "Assessment of lightning threads in Brazil and the use of lightning warning systems for human life protection," in *International Conference on Grounding and Earthing & 6th International Conference on Lightning Physics and Effects (LPE, 2014)*, 2014, pp. 1–6.

[22] C. Tovar, D. Aranguren, J. López, J. Inampués, and H. Torres, "Lightning risk assessment and thunderstorm warning systems," in *International Conference on Lightning Protection (ICLP 2014)*, 2014, pp. 1–5.

[23] L. G. Barrucho, "¿Cuáles son los países latinoamericanos donde hay más muertes por rayos?," *BBC Mundo*, Apr-2014.

[24] N. Navarrete Aldana, M. A. Cooper, and R. L. Holle, "Lightning fatalities in Colombia from 2000 to 2009," in *International Conference on Lightning Protection (ICLP 2014)*, 2014, pp. 40–46.

[25] C. A. Cruz Mosquera, "Evaluación del Riesgo por Rayos Incluyendo un Sistema de Alarma de Tormentas (SAT) en Colombia," Universidad Nacional de Colombia, 2015.

[26] C. Cruz, E. Renteria, and F. Román, "Statistics of the Colombian National Army Lightning Accidents," in *International Symposium on Lightning Protection (XII SIPDA)*, 2013, pp. 324–328.

[27] D. E. Villamil, F. Santamaria, and W. Diaz, "Lightning Disaster Risk assessment method in Colombia," in *International Symposium on Lightning Protection (XIII SIPDA)*, 2015, no. April 2016, pp. 146–152.

[28] J. O. Cantos and F. J. Ayala-Carcedo, "Riesgos Naturales," in *Riesgos Naturales*, 1ra ed., A. S.A, Ed. Barcelona, 2002, pp. 41 – 70.

[29] J. Díaz Palacios, O. Chuquisengo, and P. Ferradas, *Gestión de Riesgo en los Gobiernos Locales*. Lima, 2005.

[30] Instituto Colombiano de Normas Técnicas-ICONTEC, *NTC 4552-2 Protección contra descargas eléctricas atmosféricas (Rayos) - Parte 2: Manejo del riesgo*. Bogotá D.C., 2008, pp. 1–65.

[31] Asociación Española para la Calidad, "Herramientas sobre evaluación de riesgos," *CNIC*

Informa|, vol. 4, pp. 64–66, 2010.

[32] D. F. Munger, D. S. Bowles, D. D. Boyer, D. W. Davis, D. A. Margo, D. A. Moser, P. J. Regan, and N. Snorteland, "Interim Tolerable Risk Guidelines for US Army Corps of Enginners Dams," in *Proceedings of US Society on Dams 2009 Annual Lecture*, 2009, pp. 1–17.

[33] Secretary of State for Employment and Productivity Barbara Castle, *Health and Safety at Work*. Reino Unido, 1974, p. 121.

[34] F. C. Dai, C. F. Lee, and Y. Y. Ngai, "Landslide risk assessment and management an overview," *Eng. Geol.*, vol. 64, no. 1, pp. 65–87, 2002.

[35] J. M. Storch de Gracia and T. Martín García, *Seguridad Industrial en Plantas Químicas y Energéticas: Fundamentos, evaluación de riesgos y diseño*, 2a ed. Madrid, España, 2008.

[36] E. M. Marszal, "Tolerable Risk Guidelines," *ISA Trans.*, vol. 40, no. 4, pp. 391–399, 2001.

[37] B. Callaghan and T. Walker, *Reducing risks, protecting people - HSE's decision-making process*. Norwich, 2001.

[38] P. R. Hunter and L. Fewtrell, "Acceptable Risk," in *Water Quality: Guidelines, Standards and Health*, L. Fewtrell and J. Bartram, Eds. Padstow, Cornwall, 2001, p. 425.

[39] C. responsible for this B. Standard, *Code of practice for protection of structures against lightning*. Reino Unido, 1999, p. 125.

[40] Keraunos S.A.S, "Identificación y Análisis de los Niveles de Calidad del Servicio Alcanzables en las Redes de Distribución de Energía Eléctrica del SIN," Bogotá D.C., 2013.

[41] C. M. Estadísticas, "Metodología para el Cálculo de los Indicadores de Mortalidad," pp. 1–9, 2000.

[42] Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas - DANE, "Conceptos Básicos." pp. 1–4, 2018.

[43] D. Aranguren, J. González, A. Cruz, J. Inampués, and H. Torres, "El tiempo severo en la confiabilidad de sistemas de transmisión y distribución en Colombia." 2017.

[44] International Electrotechnical Commission-IEC, *IEC 62858 Lightning density based on lightning location systems (LLS) - General principles*. 2015, p. 26.

[45] F. Perez Puebla, "Cooperación entre las redes de rayos de España y Portugal," in *XXXVIII Jornadas Científicas de la Asociación Meteorológica Española (AME)*, 2004, pp. 1–10.

[46] G. Diendorfer, M. Bernardi, K. Cummins, F. De La Rosa, B. Hermoso, A. Hussein, T. Kawamura, F. Rachidi, V. Rakov, W. Schulz, and H. Torres, *Cloud-to-Ground Lightning Parameters Derived From Lightning Detection Systems. The Effects of System Performance - CIGRE*. 2008.

[47] H. E. Brooks and N. Dotzek, "The spatial distribution of severe convective storms and an analysis of their secular changes," in *Cllimate Extremes and Society*, H. (NICHT S. Díaz and R. (NICHT S. Murnane, Eds. Alemania: Cambridge University Press, 2008, p. pp 35–53.

[48] R. I. Albrecht, S. J. Goodman, D. E. Buechler, R. J. Blakeslee, and H. J. Christian, "Where Are the Lightning Hotspots on Earth?," *American Meteorological Society*. pp. 2051–2068, 2016.

[49] J. Inampués, D. Aranguren, A. Cruz, J. González, H. Torres, and H. D. Betz, "Severe thunderstorms in the Colombia and Venezuela high lightning active areas," in *International Symposium on Lightning Protection (XIV SIPDA)*, 2017, p. 6.

[50] O. D. Cardona Arboleda, "Estimación holística del riesgo sísmico utilizando sistemas dinámicos complejos," Universitat Politècnica de Catalunya, 2001.

[51] P. Blairie, T. Cannon, I. Davis, and B. Wisner, *Vulnerabilidad el entorno social, político y económico de los desastres*. 1996.

[52] M. García Renedo, M. Valero Valero, and J. M. Gil Beltrán, *Psicología y desastres: Aspectos psicosociales-*. Comunidad Valenciana, 2007.

[53] M. Khalegly, "Global Risk of Natural Disasters: New Perspectives," University of Waterloo, 2014.

[54] F. Kaneko, T. Arima, K. Yoshida, and T. Yuzui, "On a novel method for approximation of FN diagram and setting ALARP borders," *J. Mar. Sci. Technol.*, vol. 20, no. 1, pp. 14–36, 2015.

[55] G. B. Lo Piparo, A. Kern, and C. Mazzetti, "Some Masterpoints about Risk due to Lightning," in *International Conference on Lightning Protection, ICLP 2012*, 2012, p. 6.

[56] C. C. Prieto Rodríguez, "Metodología para la evaluación de riesgos por deslizamientos en líneas de conducción de hidrocarburos," Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá, 2011.

[57] M. Christou, Z. Gyenes, and M. Struckl, "Risk assessment in support to land-use planning in Europe: Towards more consistent decisions?," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 34, no. 3, pp. 219–226, 2011.

[58] A. W. Evans and N. Q. Verlander, "What is wrong with Criterion FN-Lines for Judging the Tolerability of Risk," *Risk Anal.*, vol. 17, no. 2, pp. 157–168, 2006.

[59] F. C. Dai, C. F. Lee, and Y. Y. Ngai, "Landslide risk assessment and management: an overview," *Eng. Geol.*, vol. 64, no. 1, pp. 65–87, 2002.

[60] S. N. Jonkman, P. H. A. J. M. Van Gelder, and J. K. Vrijling, "An overview of quantitative risk measures for loss of life and economic damage," *J. Hazard. Mater.*, vol. 99, no. 1, pp. 1–30, 2002.

[61] Center for Chemical Process Safety, *Guidelines for De veloping Quantitative Safety Risk Criteria*, Ed. 1. 2009.

[62] J. Vatn, "A discussion of the acceptable risk problem," *Reliab. Enginnering Syst. Saf.*, vol. 61, no. 1–2, pp. 11–19, 1998.

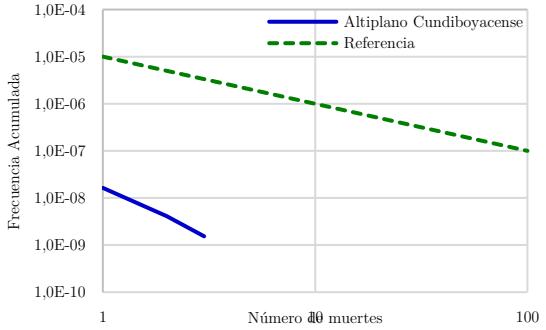
[63] J. B. Cornwell and M. M. Meyer, "Risk acceptance criteria or 'How safe is safe enough?'" pp. 1–13, 1997.

A. Anexo A: Máxima actividad de rayos por año y subregión natural

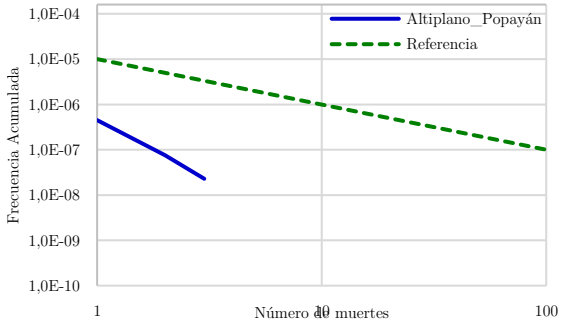
Región	2017		2016		2015		2014		2013		2012	
	Fecha	Rayos	Fecha	Rayos	Fecha	Rayos	Fecha	Rayos	Fecha	Rayos	Fecha	Rayos
Altiplano Cundiboyacense	2017-11-03	1.907	2016-09-30	1.319	2015-03-31	2.107	2014-03-15	1.119	2013-03-21	1.269	2012-03-23	1.595
Altiplano Popayán	2017-10-09	1.376	2016-03-10	1.244	2015-03-23	849	2014-12-20	771	2013-03-17	477	2012-03-18	580
Alto Magdalena	2017-08-19	13.641	2016-04-27	5.190	2015-04-16	5.858	2014-01-06	2.651	2013-09-28	2.538	2012-04-21	7.782
Amazonía	2017-09-22	29.090	2016-08-31	17.115	2015-03-28	18.013	2014-10-31	12.891	2013-11-03	14.368	2012-04-15	10.739
Catatumbo	2017-09-03	3.706	2016-10-04	3.109	2015-09-15	4.823	2014-09-17	1.073	2013-10-27	2.074	2012-05-06	2.851
Llanura Caribe	2017-08-16	70.706	2016-09-21	38.160	2015-08-21	21.227	2014-09-02	11.973	2013-05-27	10.789	2012-07-11	32.674
Llanura Costera Pacífico	2017-09-06	2.313	2016-09-21	2.969	2015-09-21	2.775	2014-10-06	1.755	2013-03-06	1.166	2012-04-17	2.647
Llanura Guajira	2017-09-23	2.773	2016-10-17	3.106	2015-10-25	4.269	2014-09-21	1.074	2013-09-28	2.195	2012-04-22	2.502
Montaña Centro	2017-08-18	11.892	2016-03-10	7.531	2015-09-30	9.140	2014-10-05	5.660	2013-04-08	4.656	2012-04-21	12.294
Montaña Noreste	2017-09-22	10.723	2016-08-12	5.229	2015-09-18	7.341	2014-10-05	4.618	2013-10-27	3.901	2012-04-23	7.333
Montaña Noroeste	2017-08-04	32.374	2016-07-27	16.443	2015-08-08	18.903	2014-10-06	12.081	2013-08-29	7.621	2012-05-04	23.976
Montaña Sur	2017-03-29	4.435	2016-03-30	2.248	2015-03-22	2.484	2014-12-20	1.632	2013-03-21	1.686	2012-04-14	3.660
Orinoquía	2017-08-15	22.881	2016-09-14	19.628	2015-11-04	12.411	2014-09-28	10.383	2013-09-03	9.858	2012-10-24	11.983
Pacífico	2017-10-09	13.908	2016-09-20	13.571	2015-08-05	13.748	2014-11-30	6.159	2013-04-02	4.042	2012-05-24	11.195
Piedemonte Amazónico	2017-11-11	4.164	2016-03-01	1.678	2015-03-22	2.887	2014-10-10	621	2013-11-03	1.027	2012-04-12	2.763
Piedemonte Llanero	2017-11-04	6.757	2016-10-28	2.996	2015-09-18	2.954	2014-10-25	2.006	2013-04-14	2.094	2012-04-21	7.237
Serranía del Baudó	2017-06-04	6.229	2016-05-14	6.748	2015-08-20	6.427	2014-08-18	2.600	2013-09-22	2.512	2012-05-04	7.360
Sierra Nevada	2017-08-03	4.106	2016-09-10	3.802	2015-09-18	4.110	2014-09-07	1.215	2013-09-27	1.480	2012-09-14	2.108
Valle del Cauca	2017-03-28	3.334	2016-05-06	2.351	2015-05-06	4.408	2014-10-11	2.430	2013-09-27	1.868	2012-03-13	3.296
Valle del Magdalena Medio	2017-09-28	37.214	2016-10-16	32.078	2015-09-30	30.373	2014-09-02	10.968	2013-04-02	24.130	2012-06-21	26.854

B. Anexo B: Riesgo Tolerable por Subregión Natural

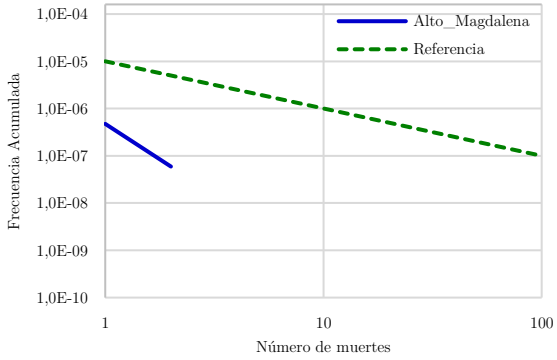
Altiplano Cundiboyacense (AC)



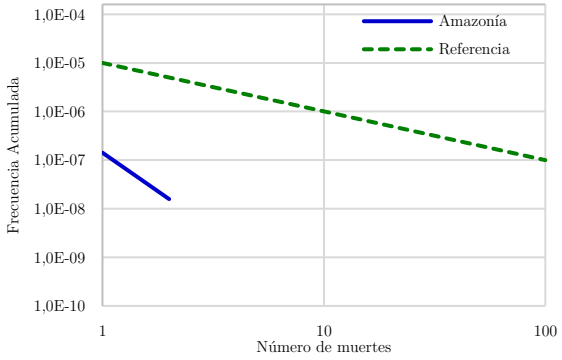
Altiplano Popayán (AP)



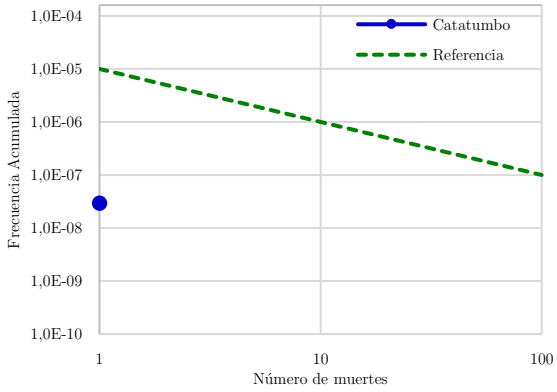
Alto Magdalena (AM)



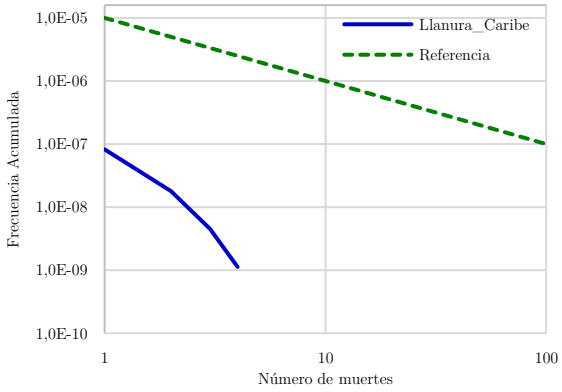
Amazonía (AZ)



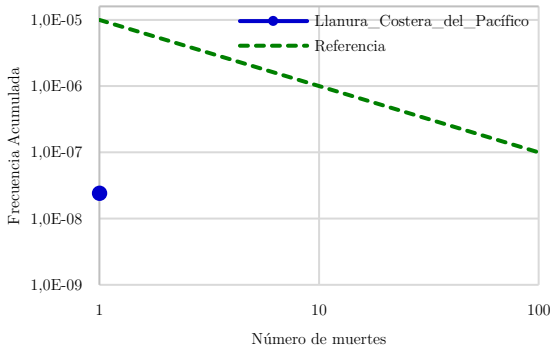
Catatumbo (CT)



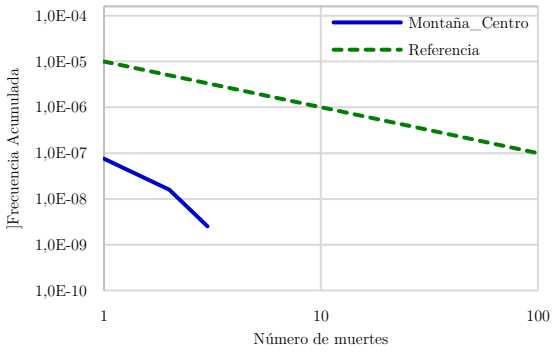
Llanura Caribe (LLC)



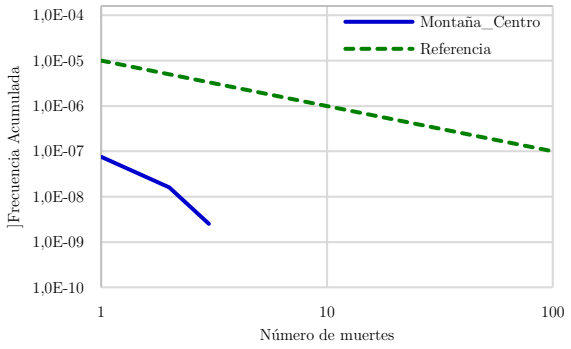
Llanura Costera del Pacífico (LLCP)



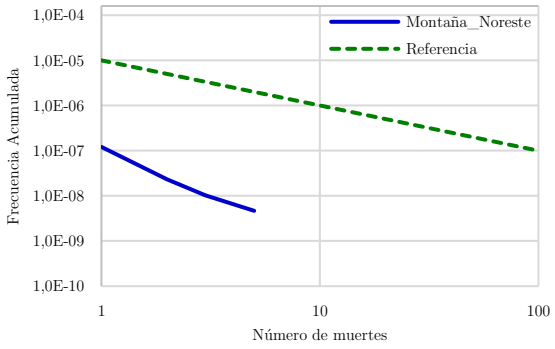
Llanura Guajira (LLG)



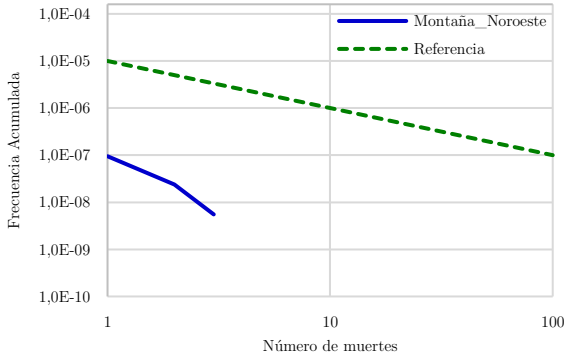
Montaña Centro (MC)



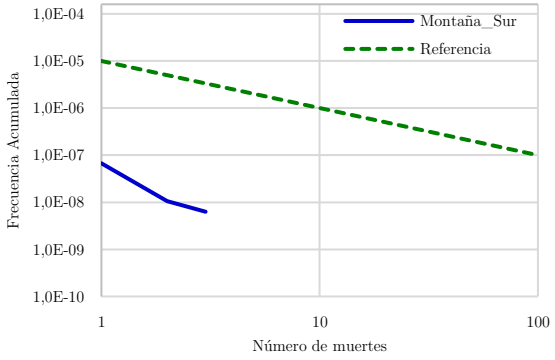
Montaña Noreste (MNE)



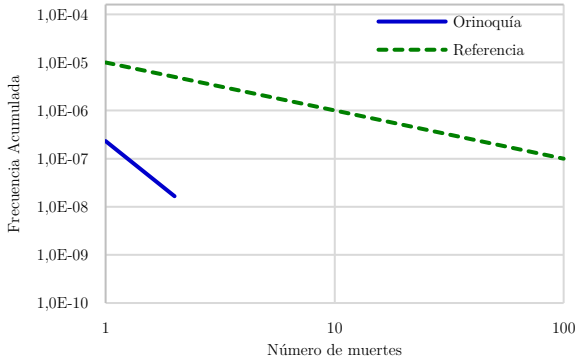
Montaña Noroeste (MNOE)



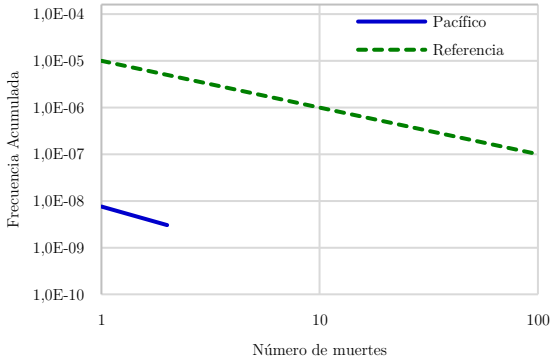
Montaña Sur (MS)



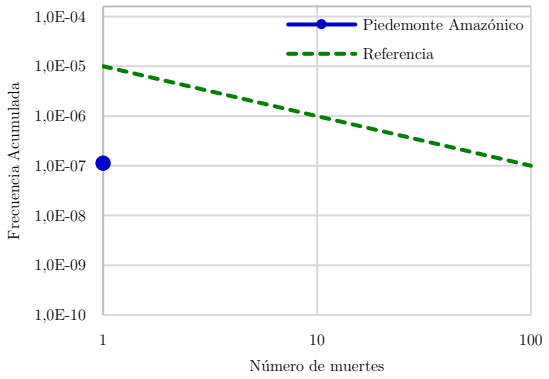
Orinoquía (OQ)



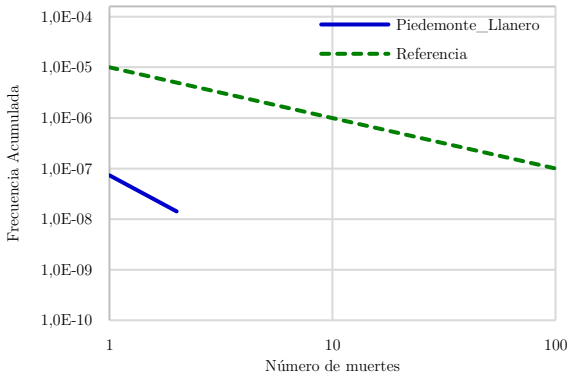
Pacífico (PF)



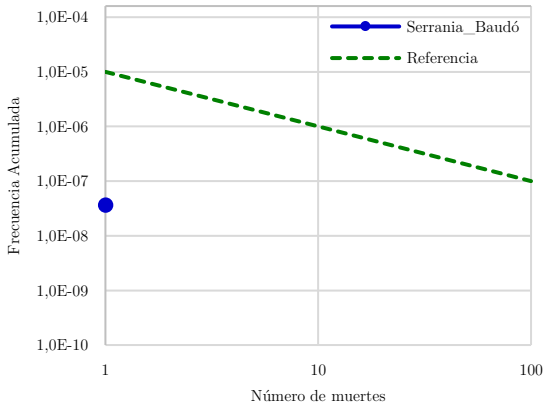
Piedemonte Amazónico (PA)



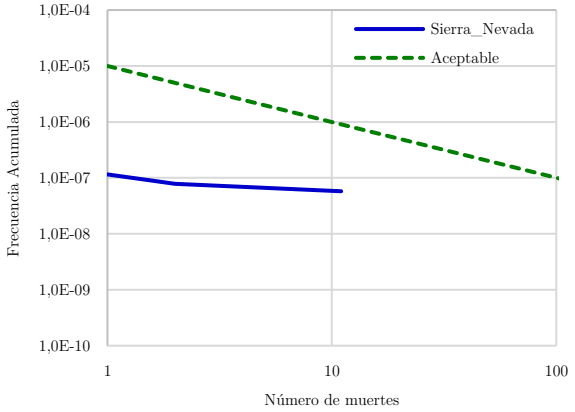
Piedemonte Llanero (PLL)



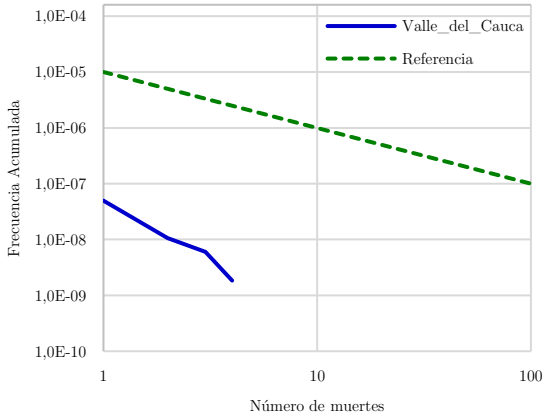
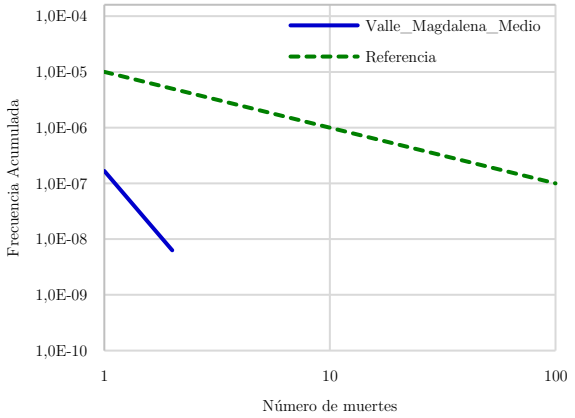
Serranía del Baudó (SB)



Sierra Nevada (SN)



Valle del Cauca (VC)



Valle del Magdalena Medio (VMM)