



Análisis del riesgo eléctrico por interferencia y/o contacto de los árboles con las redes de distribución de ENEL COLOMBIA S.A. E.S.P.

Natalia Tovar Rojas

Informe de práctica para optar al título de Ingeniera Ambiental

Asesor

Sergio Esteban Herazo Areiza, Magíster en Ingeniería Ambiental

Universidad de Antioquia
Escuela Ambiental
Ingeniería Ambiental
Medellín, Antioquia, Colombia
2023

Cita	(Tovar Rojas, 2023)
Referencia	Tovar Rojas, N. (2023). <i>Análisis del riesgo eléctrico por interferencia y/o contacto de los árboles con las redes de distribución de ENEL COLOMBIA S.A. E.S.P</i> [Trabajo de grado]. Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia.
Estilo APA 7 (2020)	



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Julio César Saldarriaga Molina.

Jefe departamento: Lina María Berrouet Cadavid.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Tabla de contenido

Resumen	7
Abstract	8
Introducción	9
1. Objetivos	11
1.1. Objetivo general	11
1.2. Objetivos específicos.....	11
2. Marco teórico	12
2.1. Contextualización.....	12
2.2. Planes de mantenimiento.....	17
2.3. Métodos multicriterio para la toma de decisiones.....	19
2.4. Modelo de crecimiento predictivo.....	21
3. Metodología	23
4. Resultados y análisis	33
5. Conclusiones	46
Referencias	48

Lista de tablas

Tabla 1 Distancias de seguridad para cada nivel de tensión.....	16
Tabla 2 Normatividad actual aplicable al proceso forestal.....	17
Tabla 3 Cantidad de árboles, de clientes e indicador de los circuitos más críticos de la Zona Metropolitana de Bogotá D.C.....	27
Tabla 4 Calificación de cada una de las variables analizadas.....	28
Tabla 5 Pesos ponderados calculados con el método AHP.....	29
Tabla 6 Especies más abundantes en los circuitos seleccionados.....	32
Tabla 7 Rangos establecidos para la frecuencia de intervención.....	33

Lista de figuras

Figura 1	Red de distribución de Enel Colombia S.A ESP. Elaboración propia.....	13
Figura 2	Criterios establecidos por Enel Colombia S.A ESP para prestar un “buen servicio”	14
Figura 3	Franja de intervención de las empresas de distribución eléctrica.....	15
Figura 4	Pasos del proceso de decisión AHP.....	20
Figura 5.	Modelo conceptual sobre la metodología empleada en el proyecto	23
Figura 6	Información descargada de ForestOne	24
Figura 7	Top 10 de circuitos más críticos de la Zona Metropolitana de Bogotá D.C.....	26
Figura 8	Representación gráfica del circuito Guaymaral. Elaboración propia.	30
Figura 9	Ubicación de los circuitos seleccionados para el análisis.....	34
Figura 10	Mapa de riesgo eléctrico circuito Fraylejona.....	35
Figura 11	Mapa de riesgo eléctrico circuito Sibaté.....	36
Figura 13	Mapa de riesgo eléctrico del circuito Barbara	37
Figura 12	Mapa de riesgo eléctrico del circuito Guaymaral	37
Figura 14	Mapa de riesgo eléctrico del circuito Limbalu	38
Figura 15	Especies más abundantes en los circuitos analizados.....	39
Figura 16	Cantidad de árboles por rango de tiempo que deben ser intervenidos en los próximos meses.	40
Figura 17	Frecuencia de intervención circuito Guaymaral.	41
Figura 18	Frecuencia de intervención circuito Sibaté.....	41
Figura 19	Frecuencia de intervención circuito Fraylejona.....	42
Figura 20	Frecuencia de intervención circuito Limbalu	42
Figura 21	Frecuencia de intervención circuito Barbara	43
Figura 22	Cantidad de árboles (%) por fuera de la franja de intervención	44

Siglas, acrónimos y abreviaturas

APA	American Psychological Association
Cm.	Centímetros
m.	Metros
CREG	Comisión de Regulación de Energía y Gas
SAIDI	System Average Interruption Duration Index
SAIFI	System Average Interruption Frequency Index
UdeA	Universidad de Antioquia

Resumen

Los sistemas de distribución de energía eléctrica están expuestos a factores ambientales que provocan interrupciones en la prestación del servicio. Alrededor del 40% de las fallas de los circuitos de la Zona Metropolitana de Bogotá son causadas por la interferencia de los árboles con la red eléctrica, sumado que dicho contacto genera riesgo eléctrico. Teniendo en cuenta que uno de los objetivos principales de Enel Colombia SA ESP es prestar un buen servicio a los clientes, además, que la regulación nacional exige a las empresas distribuidoras cumplir con unos estándares de calidad, la compañía busca implementar planes de mantenimiento cada vez más eficientes. Por lo cual, realizar un análisis del riesgo eléctrico y desarrollar un modelo de crecimiento de la vegetación para conocer la distribución y la frecuencia de las intervenciones en los circuitos más críticos, es una manera de mejorar la calidad del servicio que ofrece Enel Colombia SA ESP a los usuarios. Debido a que la información resultante permite elaborar planes de mantenimiento forestal preventivos que reducen la frecuencia y la duración de las interrupciones del servicio por árboles, y, en consecuencia, los costos de mantenimiento por aumentar la vida útil de sus activos. También, se maximizan los beneficios ambientales que los árboles ofrecen a las personas y el medio ambiente.

Palabras claves: vegetación, sistemas de distribución, planes de mantenimiento forestal, mapas de riesgo eléctrico, modelo de crecimiento de la vegetación.

Abstract

Electric power distribution systems are exposed to environmental factors that cause interruptions in service provision. Around 40% of the circuit failures in the Metropolitan Area of Bogotá are caused by the interference of trees with the electrical network, in addition to the fact that contact generates an electrical risk. Considering that one of the main objectives of Enel Colombia SA ESP is to provide a good service to customers, in addition, that national regulations require distribution companies to comply with quality standards, the company seeks to implement maintenance plans each time more efficient. Therefore, carrying out an electrical risk analysis and developing a vegetation growth model to know the distribution and frequency of interventions in the most critical circuits is a way to improve the quality of service offered by Enel Colombia SA ESP to the users. Because the resulting information allows the development of preventive forest maintenance plans that reduce the frequency and duration of service interruptions due to trees, and therefore, maintenance costs by increasing the useful life of their assets. Also, the environmental benefits that trees offer to people and the environment are enhanced.

Keywords: vegetation, distribution systems, forest maintenance plans, electric risk maps, vegetation growth model.

Introducción

La finalidad de los sistemas de distribución es suministrar energía a todos los usuarios con niveles de tensión adecuados para el consumo. Generalmente las redes eléctricas se diseñan en forma aérea, debido a que presentan un menor costo de inversión y operación en comparación con las redes subterráneas (Londoño, Hincapié Isaza, & Granada Echeverri, 2014). Por tal razón, es que alrededor del 85% de las redes de Enel Colombia S.A ESP son aéreas. Sin embargo, los índices de confiabilidad son menores para este tipo de configuración porque están expuestas a factores climáticos y aspectos ambientales como el contacto con árboles y animales que incrementan la ocurrencia de fallas en el sistema.

La interferencia de los árboles con las líneas de distribución es una de las principales causas de interrupción del servicio eléctrico. Según información suministrada por el área de calidad del servicio de Enel Colombia S.A ESP, alrededor del 40% de las fallas son generadas por árboles que se encuentran en cercanía a los sistemas de distribución de energía, puesto que al tocar las líneas energizadas pueden provocar un cortocircuito, o la caída o rotura de los conductores eléctricos si se desploman o sus ramas caen. Asimismo, el contacto de la vegetación con las redes eléctricas puede causar incendios, provocando pérdida de cobertura vegetal y biodiversidad en zonas rurales altamente arborizadas; y de activos ambientales de gran importancia para la resiliencia de las ciudades y la calidad de su medioambiente cuando se afectan los árboles urbanos.

Por otra parte, la normatividad de los servicios públicos domiciliarios establece que las empresas prestadoras podrán realizar las actividades necesarias para garantizar un servicio continuo, por lo cual, pueden retirar cualquier tipo de obstáculo que se encuentre en proximidad o en contacto con las redes eléctricas (Artículo 57. Ley 142 de 1994). Con algunas excepciones cuando se tratan de árboles dado que algunas especies no se pueden intervenir porque se han identificado con cierta categoría de vulnerabilidad o amenaza para su conservación, por lo que se consideran especies en veda (Resolución 0316 de 1974). De igual manera, la normatividad del sector eléctrico (RETIE) indica que se debe mantener un espacio libre entre los conductores eléctricos y la vegetación circundante para prevenir riesgos eléctricos.

De tal forma que las intervenciones forestales realizadas por Enel Colombia S.A. ESP están encaminadas a enfrentar las nuevas dificultades y retos asociados a la preservación del medio ambiente, al incremento de la arborización urbana y la mejora en la calidad del servicio. En general, lo que buscan las empresas distribuidoras de energía es conservar un nivel de confiabilidad de la red eléctrica dentro de los parámetros exigidos por los usuarios y entes reguladores, así como realizar mantenimientos de la vegetación sin desmejorar la integridad física de las especies (Londoño, Hincapié Isaza, & Granada Echeverri, 2014).

Por tal razón, realizar una evaluación del riesgo eléctrico a los circuitos con mayor vegetación circundante en la zona Metropolitana de Bogotá D.C es información útil para Enel Colombia S.A. ESP, debido a que a partir de estos mapas de riesgo es posible identificar las zonas más críticas y de esta manera, priorizarlas en los planes de mantenimiento del arbolado. Así mismo, el desarrollo de un modelo de crecimiento predictivo de los árboles permite determinar el instante adecuado en que las ejecuciones forestales se deben ejecutar antes de que ocurra la falla. Lo que en conjunto se traduce en una atención oportuna de los puntos de mayor prioridad, evitando la interrupción del servicio, y en el establecimiento de cronogramas de podas y/o talas más eficientes.

Por consiguiente, con la recopilación, categorización y análisis de la información existente sobre el proceso forestal de Enel Colombia S.A. ESP, y el procesamiento y modelación de esta en QGIS y Python, respectivamente, se logrará una mejor gestión del arbolado en la Zona Metropolitana de Bogotá D.C, sobre todo en los circuitos con mayor cantidad de árboles en contacto y/o interferencia con la red, dado que se conocerán los puntos más críticos y también la frecuencia óptima de intervención. Enel Colombia S.A. ESP entonces obtendrá beneficios económicos al aumentar la vida útil de sus activos, mejorar los índices de calidad del servicio eléctrico y reducir los costos de mantenimiento al evitar gastos de reparación por fallas de este tipo.

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Elaborar mapas de riesgo eléctrico por interferencia y/o contacto de los árboles con las redes de distribución y desarrollar un modelo predictivo de crecimiento de la vegetación para la elaboración de planes de mantenimiento del arbolado en los circuitos de Enel Colombia S.A ESP con mayor vegetación circundante.

1.2. Objetivos específicos

- Seleccionar las variables asociadas a la gestión del arbolado que más riesgo eléctrico causan, acorde a la información forestal y eléctrica existente, y a los planes de mantenimiento del arbolado ejecutados por Enel Colombia S.A ESP.
- Elaborar mapas de riesgo eléctrico para determinar los tramos más críticos de los circuitos con mayor cantidad de vegetación circundante y de esta manera, priorizarlos en los planes de mantenimiento forestal.
- Identificar las restricciones a las ejecuciones forestales por medio del análisis de la información del proceso forestal, y la normatividad aplicable al manejo silvicultural en la zona metropolitana de Bogotá D.C.
- Estructurar un modelo de predicción de crecimiento de la vegetación para definir la frecuencia de intervención de los árboles en los circuitos más críticos de la zona metropolitana de Bogotá D.C.
- Identificar las variables fisiológicas, morfológicas y ambientales que influyen en la tasa de crecimiento de los árboles de la zona metropolitana de Bogotá D.C., para definir la frecuencia de las intervenciones forestales del plan de mantenimiento del arbolado.

2. Marco teórico

2.1. Contextualización

Enel Colombia S.A ESP es una compañía del Grupo Enel que genera, distribuye y comercializa energía en Colombia. Es la comercializadora de energía con mayor cubrimiento en el país, alcanzando un 25% de participación debido a que suministra electricidad a más de 3.4 millones de clientes en Bogotá y en más de 100 municipios en Cundinamarca. Es por esta razón que en la actualidad cuenta con más de 120 subestaciones eléctricas y con aproximadamente 72.510 kilómetros de redes de alta, media y baja tensión, extendidas a lo largo de Bogotá y la zona rural de Cundinamarca (Enel, 2022).

Las redes eléctricas de media tensión y las subestaciones propiedad de Enel Colombia S.A ESP en Cundinamarca y la Zona Metropolitana de Bogotá D.C, componentes principales de los sistemas de distribución, se muestran en la Figura 1. Del mapa presentado se observa que aproximadamente el 85% de las redes eléctricas son aéreas debido al bajo costo en comparación con otras configuraciones. No obstante, sus índices de confiabilidad son de menor calidad en contraste con los de las redes subterráneas, a causa de factores externos relacionados con el clima, animales y vegetación (Tamayo, 2017). De igual manera, en la Zona Metropolitana es menor el porcentaje de red aérea, aun así, representa alrededor del 70% del total de las redes de distribución de la compañía (Enel, 2022).

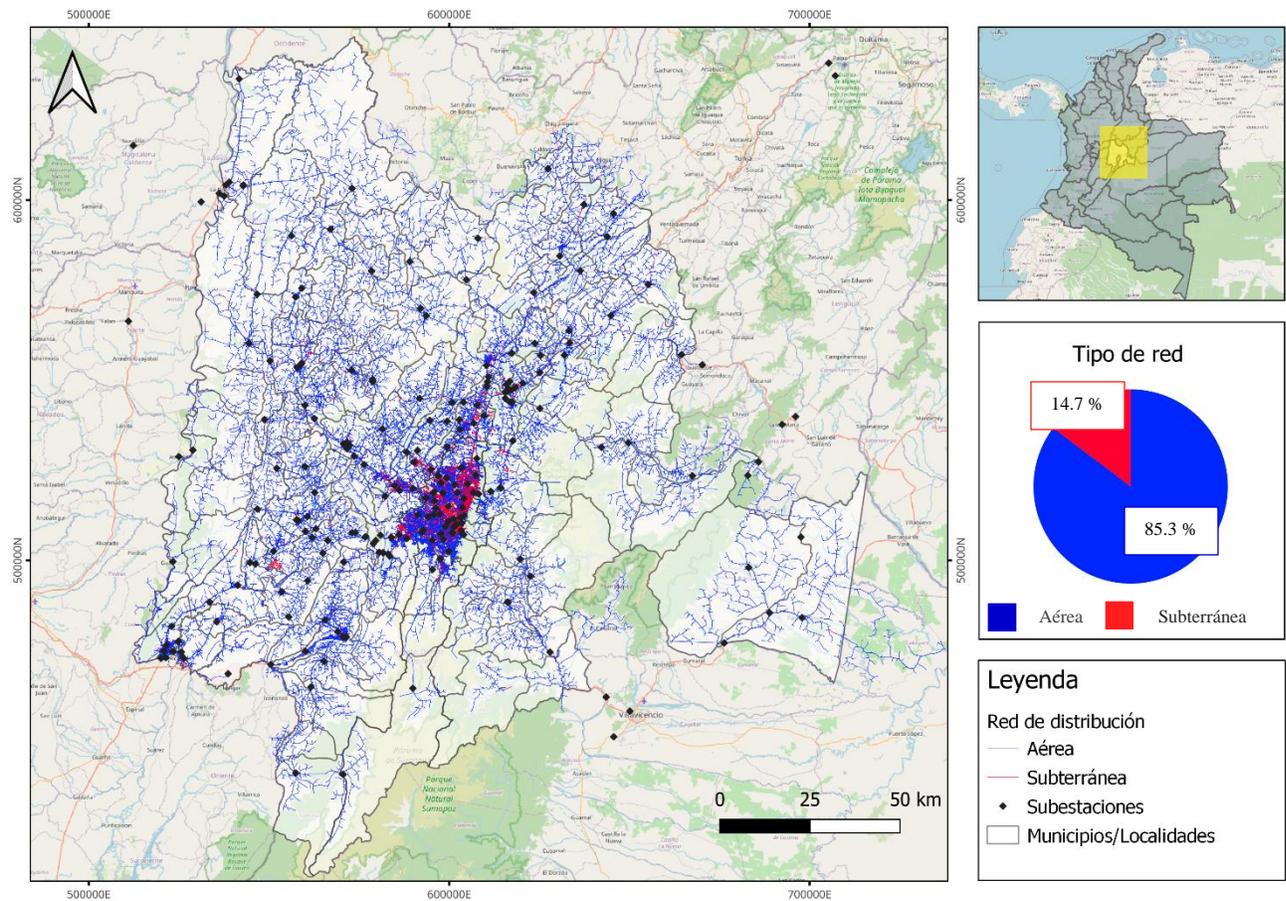


Figura 1 Red de distribución de Enel Colombia S.A ESP. Elaboración propia.

Por otra parte, uno de los objetivos fundamentales de Enel Colombia S.A ESP es brindar un buen servicio a sus clientes, teniendo en cuenta criterios como la cobertura, la confiabilidad, la calidad y la continuidad del servicio (Ver Figura 2). Dentro de los factores que más afectan la prestación del servicio, las interrupciones o fallas en los sistemas eléctricos son los que mayor impacto negativo causan en los clientes y la empresa, por lo que, Enel Colombia S.A ESP ha venido trabajando en reducir la cantidad y la duración de estas por medio del rediseño y mantenimiento de la red, la automatización y la modernización de subestaciones, entre otras (Enel, 2022).

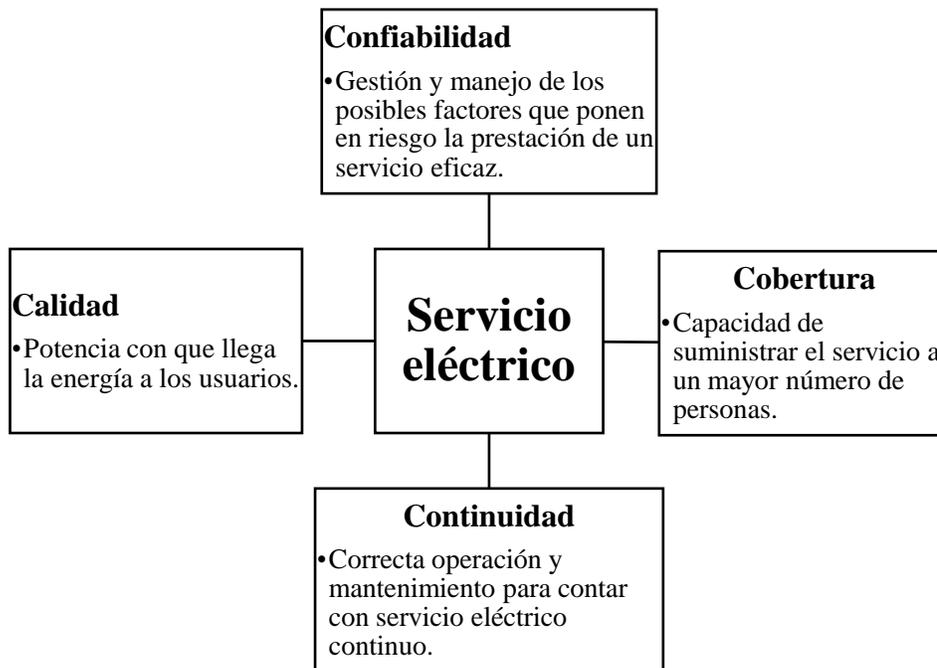


Figura 2 Criterios establecidos por Enel Colombia S.A ESP para prestar un “buen servicio”.

Tomado de: (Enel, 2022)

Del mismo modo, la regulación y la competencia actual en el sector eléctrico han venido exigiendo a los operadores de redes un eficiente planeamiento, expansión y operación de la red, con el fin de que cumplan los índices de confiabilidad y calidad del servicio, manteniendo bajos costos (Almario, 2005). La regulación colombiana (CREG) establece metas anuales con respecto a los indicadores de calidad del servicio SAIDI (Duración promedio de la interrupción) y SAIFI (Frecuencia promedio con que se da una interrupción), un 8% más estrictas año a año (CREG, 2018). Por lo cual, Enel Colombia S.A ESP redirecciona la ejecución de sus inversiones al fortalecimiento de la infraestructura eléctrica y la calidad en el suministro de energía con el fin de dar cumplimiento a las exigencias de la CREG (Enel, 2022).

No obstante, los sistemas de distribución de energía están expuestos a fallas generadas por múltiples factores. Una de las principales causas es la interferencia o el contacto de los árboles con la red eléctrica, dado que al detectarse un obstáculo se genera la activación de un equipo de protección de la red produciéndose la salida del servicio, o en el caso de que se presente la ruptura de ramas o volcamiento de árboles se genera un daño y/o afectación a la infraestructura eléctrica

(Almario, 2005). De acuerdo con la información suministrada por el área de calidad del servicio de Enel Colombia S.A ESP, alrededor del 40% de las fallas en la Zona Metropolitana de Bogotá D.C son generadas por árboles, lo cual se traduce en un impacto del mismo porcentaje en los índices de calidad del servicio.

Adicionalmente, cuando la vegetación entra en contacto con la red eléctrica se presenta riesgo eléctrico que, de acuerdo con el Decreto 383 de 2018, es aquel con potencial de daño suficiente para producir fenómenos de electrocución y quemaduras (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2018). En consecuencia, la normativa que regula el sector eléctrico ha establecido la obligación de mantener un espacio libre entre los conductores eléctricos y la vegetación circundante con el fin de prevenir potenciales riesgos (Ver Figura 3).

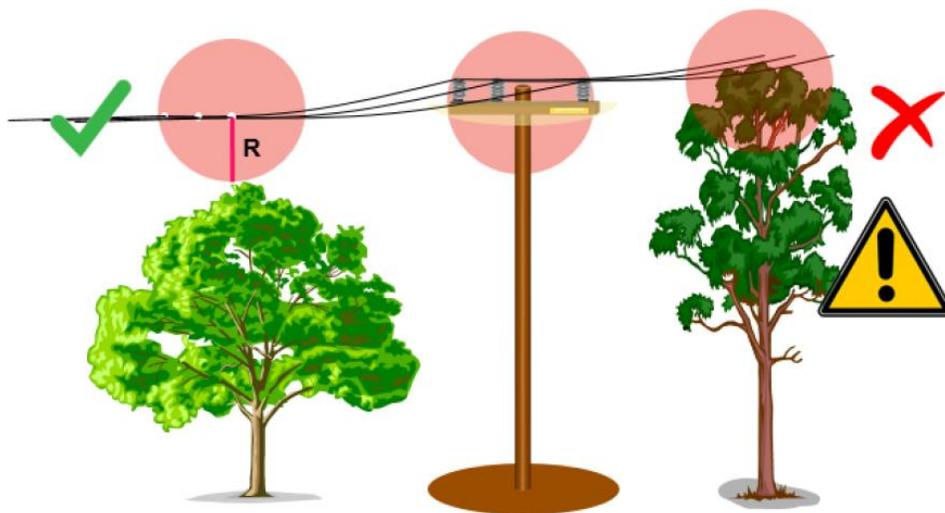


Figura 3 Franja de intervención de las empresas de distribución eléctrica.
Tomado de: (Enel Codensa, 2020)

En el artículo 13 del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE) se presentan las distancias de seguridad mínima para cada nivel de tensión (Ver Tabla 1), las cuales definen la franja de intervención de las empresas distribuidoras de energía, que hace referencia al área perimetral de radio R. (Ver Figura 3). Teniendo en cuenta que se presenta mayor riesgo eléctrico cuando los conductores son desnudos o semi aislados debido a que no existe ningún tipo de

aislamiento y tampoco se confina al 100% el campo eléctrico, es que las distancias de seguridad se establecen únicamente para este tipo de conductores (Enel Codensa, 2020).

Tabla 1.

Distancias de seguridad para cada nivel de tensión. Tomado de: (RETIE, 2013)

Nivel de tensión [kV]	Distancia de seguridad "R" [m]
Alta tensión: 500	8.6
Alta tensión: 230	6
Alta tensión: 115	4
Alta tensión: 57.5	3.5
Media tensión: 11.4; 13.2; 34.5	2.3
Baja tensión: < 1	1.7

Por otra parte, Enel Colombia S.A ESP al ser una empresa prestadora de servicios públicos puede imponer servidumbres, hacer ocupaciones temporales y remover obstáculos para prestar el servicio eléctrico de manera continua (Art 57. Ley 142 de 1994), como se cita a continuación:

“ARTÍCULO 57. Facultad de imponer servidumbres, hacer ocupaciones temporales y remover obstáculos. Cuando sea necesario para prestar los servicios públicos, las empresas podrán pasar por predios ajenos, por una vía aérea, subterránea o superficial, las líneas, cables o tuberías necesarias; ocupar temporalmente las zonas que requieran en esos predios; remover los cultivos y los obstáculos de toda clase que se encuentren en ellos; transitar, adelantar las obras y ejercer vigilancia en ellos; y, en general, realizar en ellos todas las actividades necesarias para prestar el servicio. El propietario del predio afectado tendrá derecho a indemnización de acuerdo con los términos establecidos en la Ley 56 de 1981, de las incomodidades y perjuicios que ello le ocasione” (CONGRESO DE COLOMBIA, 1981).

En cuanto a la normatividad ambiental, en las resoluciones 0316 de 1974, 0213 y 0801 de 1977 se estipulan las especies forestales en veda, es decir, aquellas que no se pueden intervenir porque se han identificado con alguna categoría de vulnerabilidad o amenaza para su conservación, por lo que se regula su uso o aprovechamiento, y se fomenta su protección. Algunas de las especies

forestales en veda son: Pino Colombiano, Nogal, Hojarasco, Molinillo, Caparrapí, Comino de la Macarena, Helecho macho, Palma boba o Palma de helecho, Palma de cera, todos los tipos de Mangle, Roble, Cedro, entre otras (Estrada, 2021).

Tabla 2

Normatividad actual aplicable al proceso forestal.

Normatividad aplicable al proceso forestal	Normatividad eléctrica		
			Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas - RETIE (Resolución 90708 de 2013)
		Comisión de Regulación de Energía y Gas - CREG (Resolución CREG 015-2018)	5.2.3 Calidad media del sistema
		Decreto Distrital 383 de 2018	Artículo 2. Definiciones (Riesgo eléctrico)
		Ley 142 de 1994	Artículo 57. Facultad de imponer servidumbres, hacer ocupaciones temporales y remover obstáculos.
	Normatividad ambiental		
		Resolución 0316 de 1974	Especies forestales en veda en el territorio nacional
		Resolución 0213 de 1977	Especies de flora en veda en el territorio nacional
		Resolución 0801 de 1977	Especies de palma y helechos en veda en el territorio nacional.
		Decreto Distrital 531 de 2010	Artículo 9. Manejo silvicultural del arbolado urbano. Artículo 10. Otorgamiento de permisos y autorizaciones.
		Manual de Silvicultura Urbana para Bogotá - Jardín Botánico de Bogotá	4.4. Manejo de la vegetación.

De modo que Enel Colombia S.A ESP realiza intervenciones silviculturales asociadas a sus actividades de operación y mantenimiento de la infraestructura o atención de emergencias, solo en los casos en que se presente riesgo eléctrico, con el fin de garantizar la continuidad en la prestación del servicio de energía eléctrica, de dar cumplimiento a la normativa y a las distancias exigidas por el RETIE, brindar seguridad a los clientes y maximizar los beneficios ambientales que los árboles ofrecen a la sociedad (Enel Codensa, 2022).

2.2. Planes de mantenimiento

El objetivo principal de los planes de mantenimiento es conservar los sistemas de distribución en condiciones de operación óptimas, así como restaurar las fallas que se presenten

durante la prestación del servicio eléctrico. Estos planes incluyen la inspección de la red con el fin de verificar su seguridad para los usuarios, pero también para identificar los defectos asociados al deterioro de los materiales y equipos eléctricos, y los ligados a la presencia de obstáculos sobre los conductores. Seguidamente se ejecutan los trabajos de mantenimiento en los tramos de red con mayor cantidad de defectos y aquellos que se consideran críticos por su grado de afectación al sistema. Estas labores se pueden realizar sin la suspensión de energía a los usuarios, con las redes energizadas; o con cortes programados en el servicio, es decir, trabajos en líneas desenergizadas (Almario, 2007).

A su vez el mantenimiento puede ser preventivo o correctivo, el primero hace referencia a sustituir componentes o subsistemas antes de que el sistema deje de operar en forma continua (García & Giraldo Vega, 2013). Mientras que el mantenimiento correctivo es la acción de restaurar un sistema en falla y llevarlo al estado de operación normal. Aun así, ambos tipos de mantenimiento se orientan a la eliminación del tiempo perdido como a la prolongación de la vida útil de los activos de la empresa, lo que en consecuencia se traduce en una reducción de los costos de mantenimiento al evitar gastos de reparación innecesarios (Tamayo, 2017)

Por su parte, el mantenimiento forestal al igual que los demás tipos busca evitar fallas que pongan en riesgo la confiabilidad del sistema de distribución, pero también impedir peligros potenciales a los usuarios y al medio ambiente. Esto indica que es principalmente de carácter preventivo porque se suelen ejecutar las podas y/o talas de las especies arbóreas cercanas a las redes eléctricas antes de que se genere el contacto y, en consecuencia, la falla de servicio debido a que el costo de reparación de la red es mayor que la intervención forestal. No obstante, cuando ocurren fallas por árboles es que se torna de carácter correctivo, puesto que debe haber atención inmediata para reparar la red eléctrica y reducir la afectación a los clientes por la suspensión del servicio.

Generalmente, la gestión forestal de la empresa de energía Enel Colombia S.A ESP empieza con la movilización del personal hacia el sitio de la falla o en dirección a los circuitos con mayor vegetación, luego se efectúa el levantamiento forestal de las especies que se encuentran afectando el sistema para después dirigirse al ente regulador a solicitar los permisos asociados al manejo

silvicultural que se realizará, en el caso de la Zona Metropolitana de Bogotá D.C, a la Secretaria Distrital de Ambiente (SDA), y a la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) para las zonas rurales; finalmente se ejecuta la poda de manera segura con personal capacitado para evitar daños irreversibles a la especie involucrada y no afectar el ecosistema (García & Giraldo Vega, 2013).

Es importante mencionar que el éxito de las intervenciones forestales empieza con el seguimiento de los procedimientos descritos en los manuales de intervenciones silviculturales expedidos por las autoridades ambientales competentes para realizar el manejo forestal correspondiente (Tabla 2); y se logra cuando se direcciona el recurso hacia los puntos más críticos del sistema, ya que se reduce la probabilidad de ocurrencia de fallas por árboles y el impacto de la afectación a los usuarios y al medio ambiente. Por lo anterior, es que se requiere de la identificación previa de los tramos de red eléctrica con mayor vegetación circundante y del cálculo de la frecuencia de las intervenciones forestales, esto con el fin de conocer la distribución y la frecuencia de las intervenciones forestales.

Ante este panorama, los planes de mantenimiento del arbolado en las empresas de distribución de energía, como es el caso de Enel Colombia S.A. ESP, son cada vez más importantes debido a que las pérdidas por la suspensión del servicio eléctrico a causa de este tipo de fallas afectan tanto al usuario como a la empresa. Por lo tanto, una adecuada gestión de la vegetación a través de programas de mantenimiento eficientes, mejoran la operación de sus activos, la confiabilidad y seguridad del servicio, y reduce el conflicto entre los árboles y la infraestructura eléctrica. De igual manera, un adecuado mantenimiento de los árboles sobrecrecidos o sobredimensionados en cercanía a las líneas energizadas evita peligros potenciales y garantiza un buen estado fitosanitario a estos individuos arbóreos para que sigan ofreciendo sus servicios ambientales.

2.3. Métodos multicriterio para la toma de decisiones.

La toma de decisiones en el proceso de gestión forestal en Enel Colombia S.A ESP se basa en criterios cualitativos y cuantitativos que se relacionan entre sí, algunos con más relevancia que

otros en dicha cuestión, pero todos influyendo en una proporción particular en el proceso. Además, directa o indirectamente definen la planificación y la ejecución de los planes de mantenimiento del arbolado. Esto indica que es posible organizarlos jerárquicamente de acuerdo con su grado de importancia en el proceso forestal. Es por esta razón que para identificar las zonas más críticas de las redes de distribución de Enel Colombia S.A ESP y representarlas gráficamente es necesario emplear métodos multicriterio de toma de decisiones, que permitan asignar pesos, jerarquías o ponderaciones a los distintos criterios que influyen en la determinación del riesgo eléctrico (Ramírez, 2004)

Uno de los métodos multicriterio más utilizados es el método cuantitativo Analytic Hierarchy Process (AHP), propuesto por Thomas Saaty en 1980, el cual permite generar escalas de prioridades basándose en juicios expertos manifestados a través de comparaciones por pares mediante una escala de preferencia (Nantes, 2019). En la Figura 4 se presentan los pasos del proceso de decisión con AHP, evidenciándose que consiste principalmente en organizar la información con respecto a un problema o proceso, descomponerla y analizarla por partes, luego comparar los criterios de acuerdo con una escala de preferencia y finalmente, sintetizar (Bruno, 2005).

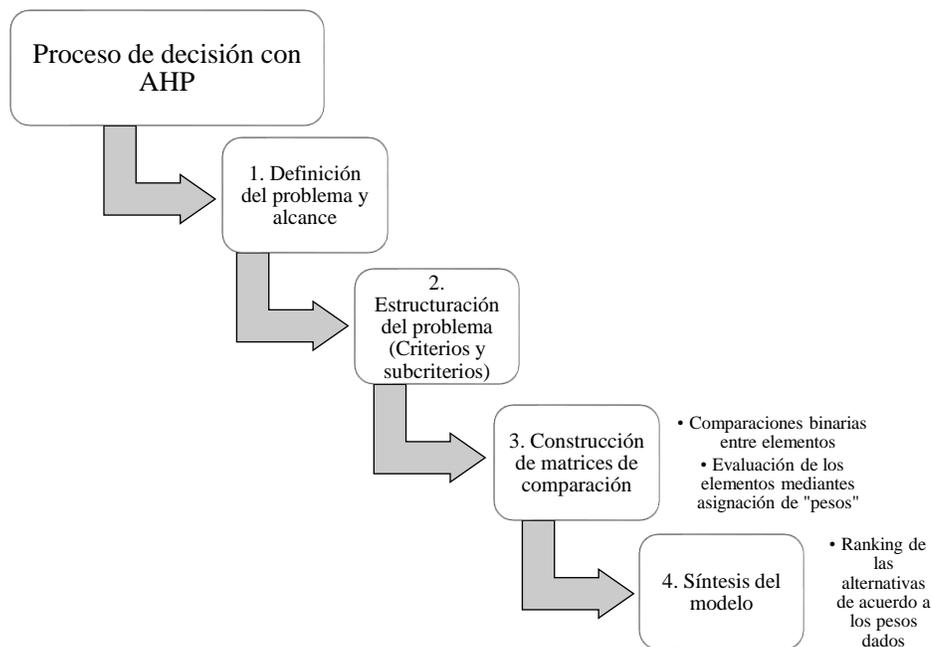


Figura 4 Pasos del proceso de decisión AHP.
Tomado de (Nantes, 2019)

Los pesos ponderamos determinados con AHP para cada una de las variables analizadas junto con la información recopilada y organizada del proceso de gestión forestal de Enel Colombia S.A ESP son la base para la elaboración de los mapas de riesgo eléctrico. Esta representación gráfica permite determinar la distribución de las intervenciones forestales porque facilita la identificación de los tramos más críticos de los circuitos teniendo en cuenta la cantidad de árboles en cercanía a la red y las restricciones forestales, esto es, las especies en veda y las podas drásticas. La información resultante es útil para la creación de planes de mantenimiento forestal eficientes y para la mejora del proceso de gestión forestal de la empresa.

2.4. Modelo de crecimiento predictivo

De acuerdo con la mencionado anteriormente para la estructuración de los planes de mantenimiento forestal también es importante determinar la frecuencia de las intervenciones forestales porque permite realizar el manejo silvicultural antes de que se presente el contacto con los conductores, lo cual está muy relacionado con el carácter preventivo de este tipo de planes; y además, con la información resultante es posible elaborar un cronograma de podas acorde al crecimiento de cada árbol y la distancia a la red eléctrica, reduciendo significativamente la cantidad y duración de las interrupciones del servicio por factores ambientales.

La tasa de crecimiento representa la velocidad con que el crecimiento de los árboles ocurre, es decir, la cantidad de centímetros que crece cada cierto tiempo. El desarrollo de los árboles depende de múltiples factores fisiológicos y morfológicos que varían de acuerdo con la especie, pero también depende de variables ambientales como la temperatura, el tipo de suelo, la precipitación, etc. Otra cuestión importante es la competencia entre árboles vecinos por agua, nutrientes y luz, la cual también influye en el crecimiento forestal (Wabo, 2002). Lo anterior indica que determinar con exactitud la tasa de crecimiento de los árboles resulta complejo, aun así, se han realizado diversos estudios para determinarla, uno de ellos es la “GUIA DE ÁRBOLES DE SANTA FÉ DE BOGOTÁ” elaborada por el Departamento Técnico Administrativo de Medio Ambiente, en este libro se presentan los árboles más abundantes de la Zona Metropolitana de Bogotá D. C y sus características, dentro de las que se incluyen la tasa de crecimiento y su altura máxima.

En cuanto a la infraestructura eléctrica, la red permanece en el mismo lugar y a la misma altura a menos de que sea afectada por factores externos o se cambie su trazado. Por lo que, su variabilidad es mínima en comparación con los árboles, puesto que todos aquellos que se encuentren debajo o en cercanía a la red en algún momento, ya sean días, meses o años, entraran en la franja de intervención definida por la RETIE, y posteriormente en contacto con la red eléctrica. Aun así, la ubicación y la altura de la red son importantes para el desarrollo del modelo de crecimiento predictivo porque define la “altura máxima” de los árboles, lo que en conjunto con la tasa de crecimiento y la morfología de los individuos arbóreos permiten calcular el tiempo que tardarán los árboles de la zona metropolitana de Bogotá D.C. en alcanzar la red eléctrica.

3. Metodología

La metodología que se siguió en este proyecto se resume en el siguiente modelo conceptual, y seguidamente se describen cada una de las etapas que la componen.

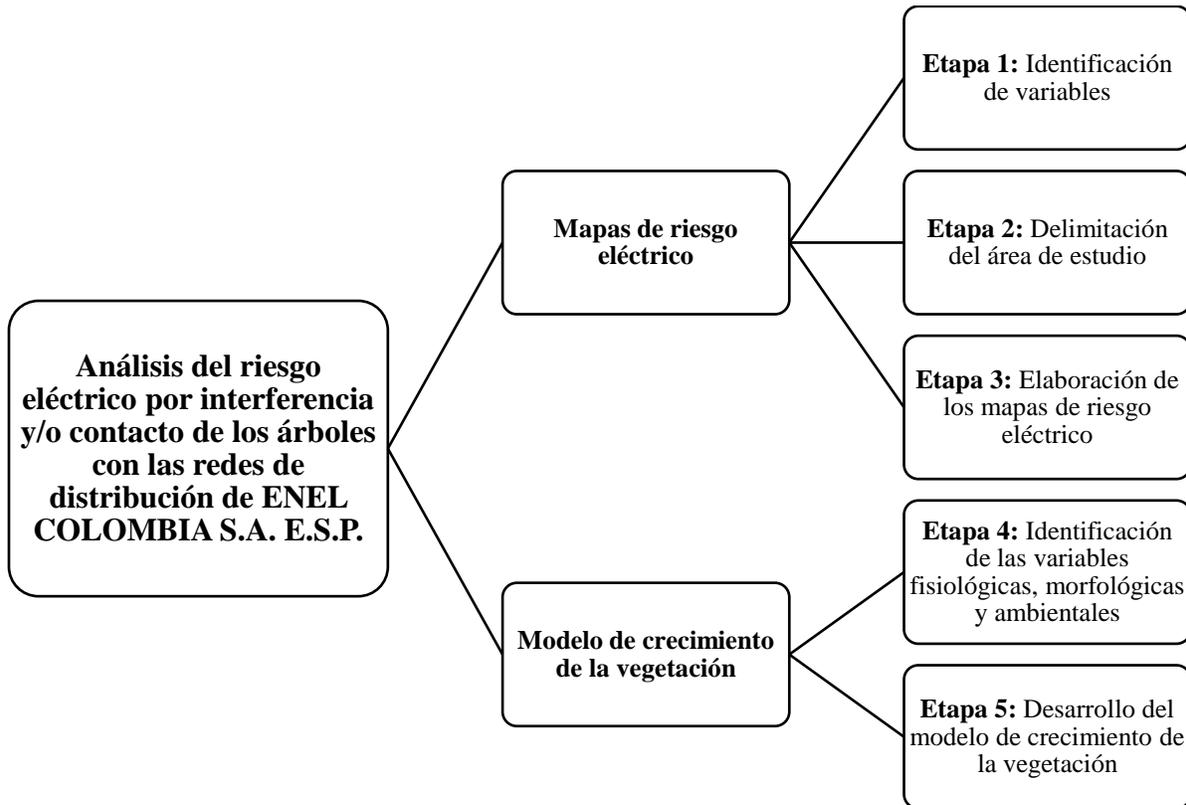


Figura 5. Modelo conceptual sobre la metodología empleada en el proyecto

Etapas 1: Identificación de variables

En esta primera etapa del proyecto se realizó una revisión bibliográfica sobre los sistemas de distribución de energía, las actividades de manejo silvicultural, el proceso de gestión forestal de Enel Colombia S.A ESP; así como también de toda la normatividad aplicable a dicha gestión. Esto con el fin de conocer los objetivos, el alcance y las restricciones definidas por la regulación nacional. También se investigaron métodos multicriterio para la toma de decisiones, debido a que el proceso en sí consta de diversas variables que influyen de manera particular en la toma de decisiones, por lo tanto, es posible descomponerlo en partes para evaluar el grado de influencia de cada una de ellas.

También, se recurrió al sistema de gestión forestal de la empresa, ForestOne, en el cual se recopila toda la información relacionada con las intervenciones forestales realizadas por Enel Colombia S.A ESP. Esta base de datos es fundamental en el proceso porque contiene el histórico y los soportes de todas las actividades de manejo silvicultural realizadas independientemente del origen de la solicitud, es decir, incluye las ejecuciones provenientes de los planes de mantenimiento, emergencias y/o peticiones de clientes y autoridades ambientales. Además, es el medio por el cual se interactúa con las empresas colaboradoras, en relación con la aprobación, revisión y reporte de todas las podas o talas ejecutadas en la jurisdicción de Enel Colombia S.A ESP.

Por lo anterior, es que de ForestOne se descargó toda la información relacionada con los árboles intervenidos por Enel Colombia S.A ESP en la Zona Metropolitana de Bogotá D.C. El formato de descarga contiene datos de la infraestructura o red eléctrica que está contacto con el árbol, información forestal que incluye la especie y las dimensiones del individuo arbóreo por mencionar algunas variables; y de ubicación como las coordenadas, localidad o municipio y dirección, etc. En la Figura 6 se presenta la información más relevante que se descargó de ForestOne asociada a los árboles ejecutados.

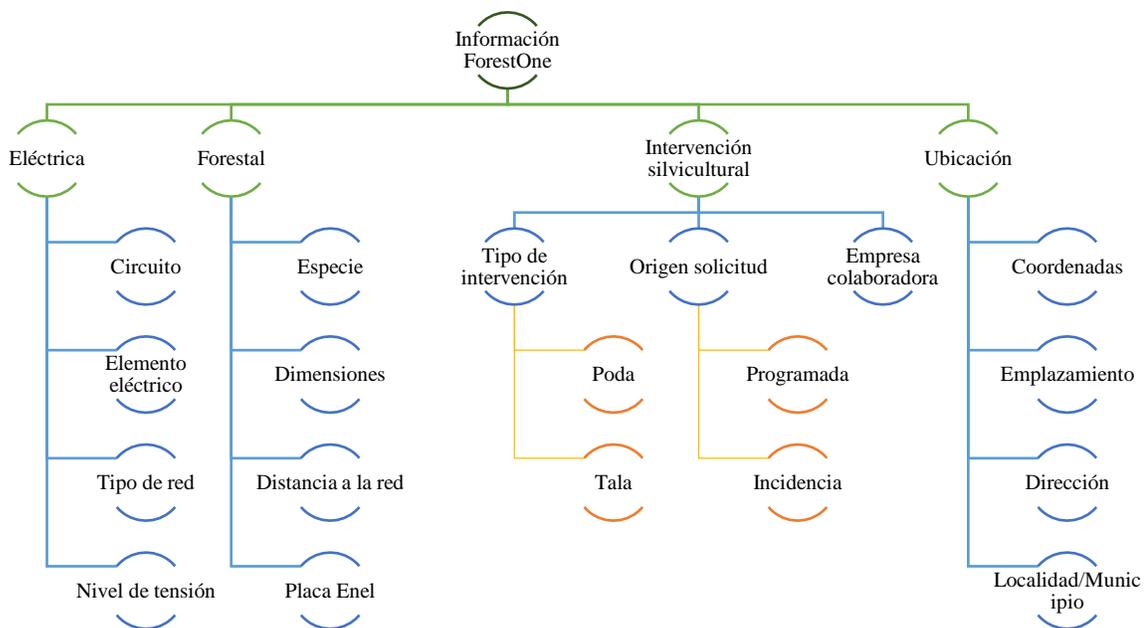


Figura 6 Información descargada de ForestOne

De acuerdo con el procedimiento descrito sobre los planes de mantenimiento, es que previamente se realiza una inspección de la red eléctrica para identificar los defectos o puntos de fallas del sistema que, en este caso, son los árboles. Por lo tanto, Enel Colombia S.A ESP todos los años realiza levantamientos forestales, en donde se registran los árboles en interferencia y/o contacto con la red, especificando la especie, el tipo de mantenimiento a realizar de acuerdo con las características propias de cada árbol y de la red; el recurso necesario para ejecutar la poda o tala, es decir, línea energizada o desenergizada; el número de placa asignado para su identificación, etc.

Generalmente, los árboles inventariados durante la inspección de la red son los que se consideran más críticos porque tienen mayor probabilidad de generar una falla en el sistema de distribución y afectar gran cantidad de clientes, se encuentran en mal estado fitosanitario y pueden volcarse sobre la red; o están en interferencia con red de media tensión desnuda en donde el riesgo eléctrico es mayor. En estos levantamientos también se incluyen los árboles que se encuentran en conflicto con los conductores, pero que a su vez son especies en veda, debido a que también se busca identificar los tramos de red que requieren medidas técnicas, es decir, cambios en el tipo de configuración del conductor porque no es posible realizar la intervención forestal.

De esta manera, se definieron las tres (3) variables seleccionadas para la elaboración de los mapas de riesgo eléctrico. La primera de ellas fue la cantidad de **árboles ejecutados**, puesto que, la densidad forestal está directamente relacionada con el riesgo eléctrico, al considerar que los tramos con mayor vegetación circundante tienen mayor potencial de riesgo eléctrico. Así mismo, la cantidad de **árboles pendientes** de ejecución fue la segunda variable, y hace referencia a los individuos arbóreos que fueron levantados en la inspección de la red, pero que al momento del análisis no se habían intervenido, lo que se traduce en un incremento de la probabilidad de falla del servicio y de riesgo eléctrico.

Otra de las variables seleccionadas fue la cantidad de **medidas técnicas**, la cual se determinó a partir de las especies en veda y las podas drásticas consignadas en los levantamientos forestales; la ejecución de estas últimas se restringe porque se debe remover más del 30% de la copa del árbol, y de acuerdo con los lineamientos técnicos establecidos por las autoridades

ambientales y los procedimientos descritos en los manuales de manejo silvicultural se afectaría el estado fitosanitario de los árboles siendo inviable realizar la poda, pero sí realizar cambios en la red eléctrica para liberar el contacto.

Etap 2: Delimitación del área de estudio.

Por otra parte, para delimitar el área de estudio se tuvieron en cuenta la cantidad de árboles, de clientes y la longitud de la red eléctrica, esto con el fin de seleccionar los circuitos más críticos de la Zona Metropolitana de Bogotá D.C. Para lo cual, se compiló la información de todos los levantamientos forestales realizados por Enel Colombia S.A ESP desde el 2020, y se calculó un indicador de cantidad de árboles por kilómetro de red aérea. De los resultados obtenidos se escogieron los cinco (5) circuitos más críticos para realizar el análisis de riesgo eléctrico y desarrollar el modelo de crecimiento de la vegetación, teniendo en cuenta que la variable de mayor relevancia fue la cantidad de árboles con un 75% de importancia, seguida de la cantidad de clientes con un 15% y finalmente la cantidad de árboles por kilómetro de red aérea con una criticidad del 10%.

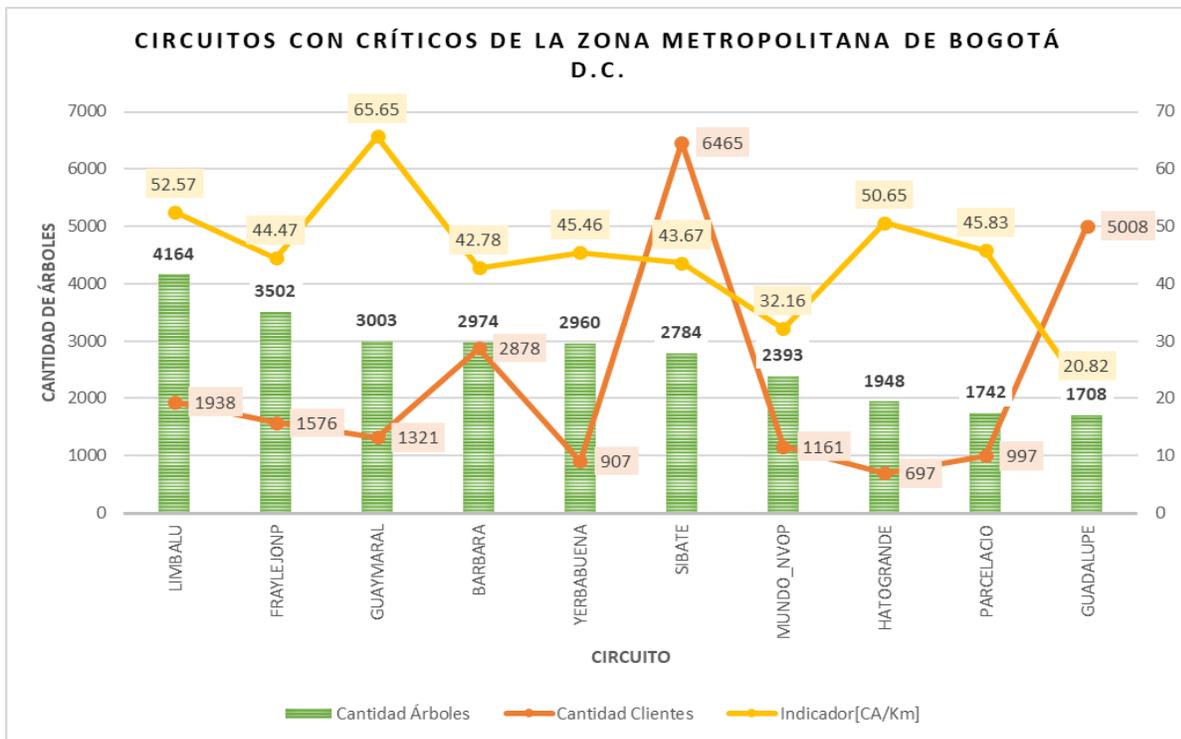


Figura 7 Top 10 de circuitos más críticos de la Zona Metropolitana de Bogotá D.C.

En la Figura 7, se muestran los diez (10) circuitos más críticos de la Zona Metropolitana de Bogotá D.C siendo el Limbalu, el Fraylejona y el Guaymaral los que tienen más de 3000 árboles en cercanía a la red eléctrica. Mientras que los circuitos Sibaté, Guadalupe y Limbalu cuentan con la mayor cantidad de clientes del grupo de circuitos con más vegetación circundante. En cuanto al indicador, los circuitos Guaymaral, Limbalu y Hatogrande son los que presentan mayor cantidad de árboles por kilómetro de red aérea. En consecuencia, y luego de realizar la ponderación de acuerdo con el grado de importancia, se obtuvo que los cinco (5) circuitos más críticos, considerando las tres variables mencionadas anteriormente, son Limbalu, Sibaté, Fraylejona, Barbara y Guaymaral (Ver Tabla 3). Es importante mencionar que la escala de colores empleada en la Tabla 3 señala los mayores valores en rojo y los menores en verde, con el fin de facilitar la selección de los circuitos a analizar.

Tabla 3

Cantidad de árboles, de clientes e indicador de los circuitos más críticos de la Zona Metropolitana de Bogotá D.C.

CIRCUITO	CANTIDAD ÁRBOLES	CANTIDAD CLIENTES	INDICADOR[CA/Km]	PONDERACIÓN
LIMBALU	4164	1938	52.57	3465.21
SIBATE	2784	6465	43.67	3099.40
FRAYLEJONA	3502	1576	44.47	2906.78
BARBARA	2974	2878	42.78	2704.79
GUAYMARAL	3003	1321	65.65	2498.17
YERBABUENA	2960	907	45.46	2401.00
GUADALUPE	1708	5008	20.82	2052.39
MUNDO_NVOP	2393	1161	32.16	2001.34
HATOGRANDE	1948	697	50.65	1608.00
PARCELACIO	1742	997	45.83	1499.70

■ Criticidad baja (Valores menores)
 ■ Criticidad intermedia (Valores intermedios)
 ■ Criticidad alta (Valores mayores)

Etapa 3: Elaboración de los mapas de riesgo eléctrico.

En esta etapa del proyecto se graficó y se procesó en QGIS la información forestal y eléctrica de los cinco (5) circuitos seleccionados para el análisis. No obstante, antes de ello fue necesario determinar los árboles pendientes, es decir, aquellos que para el momento del análisis no se habían ejecutado y que de acuerdo con los levantamientos forestales sí requerían intervención. Para esto se empleó la consola de Python que se encuentra en QGIS y se realizó una comparación entre los árboles ejecutados, información que se extrajo de ForestOne, y los árboles levantados en la inspección de la red de distribución; lo cual fue posible debido a que cada árbol tiene una placa de identificación única y también porque de la información descargada de ForestOne es posible conocer la última fecha de intervención. Por lo tanto, aquellos árboles que no se encontraron en el registro de ForestOne y los que sí pero que habían sido intervenidos antes de la fecha en que se realizó el levantamiento forestal se consideraron como árboles pendientes.

La otra variable que se tuvo en cuenta en la elaboración de los mapas de riesgo eléctrico fue la cantidad de medidas técnicas. Para lo cual, se seleccionaron las especies en veda, es decir, el Pino Colombiano, Nogal, Hojarasco, Molinillo, Caparrapí, Comino de la Macarena, Helecho macho, Palma boba o Palma de helecho, Palma de cera, Roble y Cedro de todos los árboles intervenidos y levantados. Asimismo, se extrajo de los levantamientos forestales los árboles que requerían poda drástica. Esta información se consolidó y así fue como se definió la tercera variable forestal para el análisis de riesgo eléctrico.

Es importante mencionar que la información descargada de ForestOne incluye el histórico de todas las intervenciones forestales ejecutadas, por lo que es posible que para un mismo árbol se encuentren varios reportes dependiendo de la cantidad de podas que se le hayan realizado. Por lo tanto, para conocer la cantidad real de árboles se tuvo que seleccionar únicamente la información asociada a la última intervención forestal, descartando además todas las inspecciones realizadas. La depuración de esta información se llevó a cabo en Python por el gran volumen de datos, y para que este procedimiento se siguiera haciendo de manera continua a medida que se agregara más información, debido a que las intervenciones forestales se ejecutan y se reportan a diario.

Luego de tener toda la información organizada, se procede a calcular los pesos ponderados para cada una de las variables seleccionadas por medio del método AHP, y para ello fue necesario definir el grado de importancia de cada una de ellas. Se realizó la comparación por pares y se asignaron los pesos de acuerdo con la escala de importancia definida en el método AHP, en donde la mayor importancia se califica con 9 y la menor con el inverso, es decir, 1/9. Para este caso, la calificación se asignó como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4

Calificación de cada una de las variables analizadas.

	C1	C2	C3	
C1	1	1/2	1/4	C1: Cantidad de árboles ejecutados
C2	2	1	1/2	C2: Cantidad de árboles pendientes
C3	4	2	1	C3: Cantidad de medidas técnicas

Finalmente se obtuvieron los pesos ponderados para cada una de las variables analizadas siguiendo el procedimiento del método AHP. Los resultados obtenidos se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 5

Pesos ponderados calculados con el método AHP

		PESOS
C1	Cantidad de árboles ejecutados	0.14
C2	Cantidad de árboles pendientes	0.29
C3	Cantidad de medidas técnicas	0.57
		1.00

Los valores presentados en la Tabla 5 evidencian que la variable con mayor “peso” es la cantidad de medidas técnicas, seguida de la cantidad de árboles pendientes, y en última posición se encuentra la cantidad de árboles ejecutados. La preferencia asignada se definió de acuerdo con el criterio del equipo de gestión forestal de Enel Colombia S.A ESP, así como de las restricciones

impuestas por las autoridades ambientales para la intervención de especies forestales en conservación y tipos de manejo silvicultural.

Después de contar con la información organizada y los pesos ponderados se prosiguió a graficarla y procesarla en QGIS. En primer lugar, se añadió todo el sistema de distribución de los cinco (5) circuitos seleccionados, la cual incluía los centros de distribución y los elementos de protección de la red; y la información forestal que fue previamente depurada y consolidada. Evidenciando que la representación gráfica del proceso de gestión forestal facilitó la interpretación de grandes cantidades de datos de forma clara y coherente, y a su vez comprender mejor el estado forestal de los circuitos y tomar mejores decisiones en el momento en que se presentaban emergencias por árboles (Ver Figura 8).

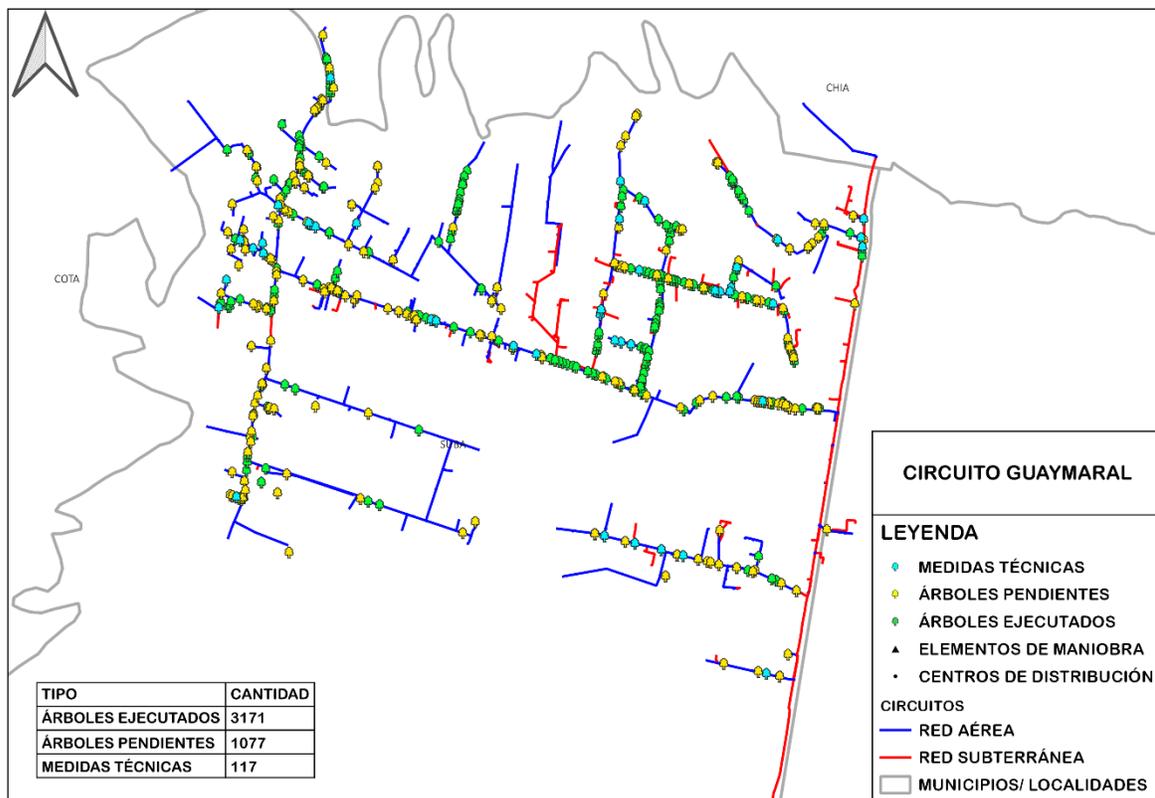


Figura 8 Representación gráfica del circuito Guaymaral. Elaboración propia.

Para la creación de los mapas de riesgo eléctrico se tuvo en cuenta la geometría de los datos, es decir, que la mayoría de las variables eran puntos. Es por esta razón que se elaboraron mapas de

calor con cada una de las variables para luego unir los resultados obtenidos y multiplicarlos por los pesos ponderados. Todo esto se desarrolló haciendo uso de las herramientas de geoprocésamiento de QGIS, empezando con el cálculo de parámetros estadísticos para determinar el radio óptimo de los mapas de calor. Luego, se reclasificaron los datos y se convirtieron a ráster para realizar la ponderación, y así obtener los mapas de riesgo eléctrico con los criterios establecidos.

Etapas 4: Identificación de las variables fisiológicas, morfológicas y ambientales para la creación del modelo de crecimiento predictivo de la vegetación.

En esta etapa del proyecto fue necesario realizar una revisión bibliográfica para identificar las variables más influyentes en el crecimiento y desarrollo de los árboles, sabiendo que al ser seres vivos su funcionamiento es complejo y depende significativamente de las características de su entorno, y los recursos que tienen disponibles. Lo anterior con el fin de reconocer las limitaciones y el alcance del modelo que se desarrolló, debido a que se asumieron condiciones ambientales generales aun sabiendo que la Zona Metropolitana de Bogotá D.C cuentan con microclimas a lo largo de toda su extensión. En cuanto a las variables propias de los árboles, si se asignó la tasa de crecimiento acorde a cada especie arbórea.

Etapas 5: Desarrollo del modelo de crecimiento predictivo de la vegetación.

El primer paso fue organizar y depurar la información debido a que algunos datos eran inconsistentes, en específico, los relacionados a la información forestal. La altura consignada en ForestOne para algunos árboles no era lógica, sabiendo que acorde a la especie pueden alcanzar una altura máxima, por lo que valores por encima de lo reportado en la bibliografía no se consideraron correctos. Para lo cual, se reemplazaron los datos incongruentes por la altura máxima reportada en estudios realizados en la Zona Metropolitana de Bogotá D.C. También fue necesario separar los árboles que habían sido talados de los podados para el desarrollo del modelo, dado que estos ya no estaban presentes.

Por otra parte, la altura de la red eléctrica fue el límite de crecimiento establecido para los árboles, y se asumió un valor promedio de 12 metros. De modo que, la ecuación que se construyó para determinar el tiempo en que se debe realizar la poda antes de que entre en contacto y/o interferencia con los conductores eléctricos fue la siguiente:

$$Tiempo_Poda[meses] = \frac{(A_R - A_A) \times 100}{t}$$

Donde,

AR: Altura de la red eléctrica [m]

AA: Altura del árbol [m]

T: Tasa de crecimiento del árbol [cm/mes]

En cuanto a la tasa de crecimiento, esta se extrajo de diversos estudios realizados en la Zona Metropolitana de Bogotá D.C, pero la mayoría de la “GUIA DE ÁRBOLES DE SANTA FÉ DE BOGOTÁ” elaborada por el Departamento Técnico Administrativo de Medio Ambiente, y también de las bases de datos de la Enel Colombia S.A ESP. Es relevante traer a colación que las tasas de crecimiento utilizadas estaban asociadas a condiciones ambientales promedio de la ciudad de Bogotá D.C, considerándose entonces que el clima es frío y muy seco, que el promedio de lluvias es de 797 mm y la temperatura promedio es de 13.1 °C.

Para los circuitos seleccionados, las especies de árboles más abundantes junto con su tasa de crecimiento se presentan en la Tabla 6. De la información reportada se evidencia que el Pino Ciprés, la Acacia Japonesa, la Acacia negra, el Eucalipto y el Pino Patula son las especies más abundantes, y que de ellas la familia de las Acacias son las que crecen más rápido.

Tabla 6
Especies más abundantes en los circuitos seleccionados

ESPECIE	TASA DE CRECIMIENTO [Cm/MES]
PINO CIPRES	3.9
EUCALIPTO	17
ACACIA JAPONESA	19.5
ACACIA NEGRA	19.5
PINO PATULA	5.2

El procesamiento de los datos se ejecutó en Python, y los resultados obtenidos se agruparon por rangos para ser representados gráficamente. A los árboles que debían ser podados inmediatamente se les asignó el color rojo, a los que se encontraron dentro de la franja de intervención, y debían podarse antes de los 6 meses, el color anaranjado; mientras que aquellos que

mantenían una distancia significativa a la red, pero aún se encontraban a menos de 2.7 metros de la red, el color amarillo; y a los demás, es decir, para los árboles que cumplen con la distancia establecida en el RETIE se colorearon de verde (Ver Tabla 7).

Tabla 7
Rangos establecidos para la frecuencia de intervención.

Rango	Color
<2 mes	Rojo
2-6 meses	Naranja
7-12 meses	Amarillo
>12 meses	Verde

4. Resultados y análisis

El proceso de gestión forestal de Enel Colombia S.A ESP atiende alrededor de 1000 circuitos en toda la Zona Metropolitana de Bogotá D.C, pero en este proyecto únicamente se seleccionaron cinco (5) circuitos para realizar el análisis debido a la cantidad de datos que representa el contemplar toda la red de distribución. Los circuitos seleccionados corresponden a los más críticos de la Zona Metropolitana de Bogotá D.C, en relación con la cantidad de árboles que tienen a su alrededor, la cantidad de clientes que atienden y la cantidad de árboles por kilómetro de red aérea. En la Figura 9 se pueden observar los circuitos escogidos, de los cuales cuatro (4) se encuentran en los municipios de Tabio, Tenjo, Sibaté, Soacha y La Calera, y el otro en la localidad de Suba, lo cual indica que se encuentran dispersos y la mayoría en la zona rural.

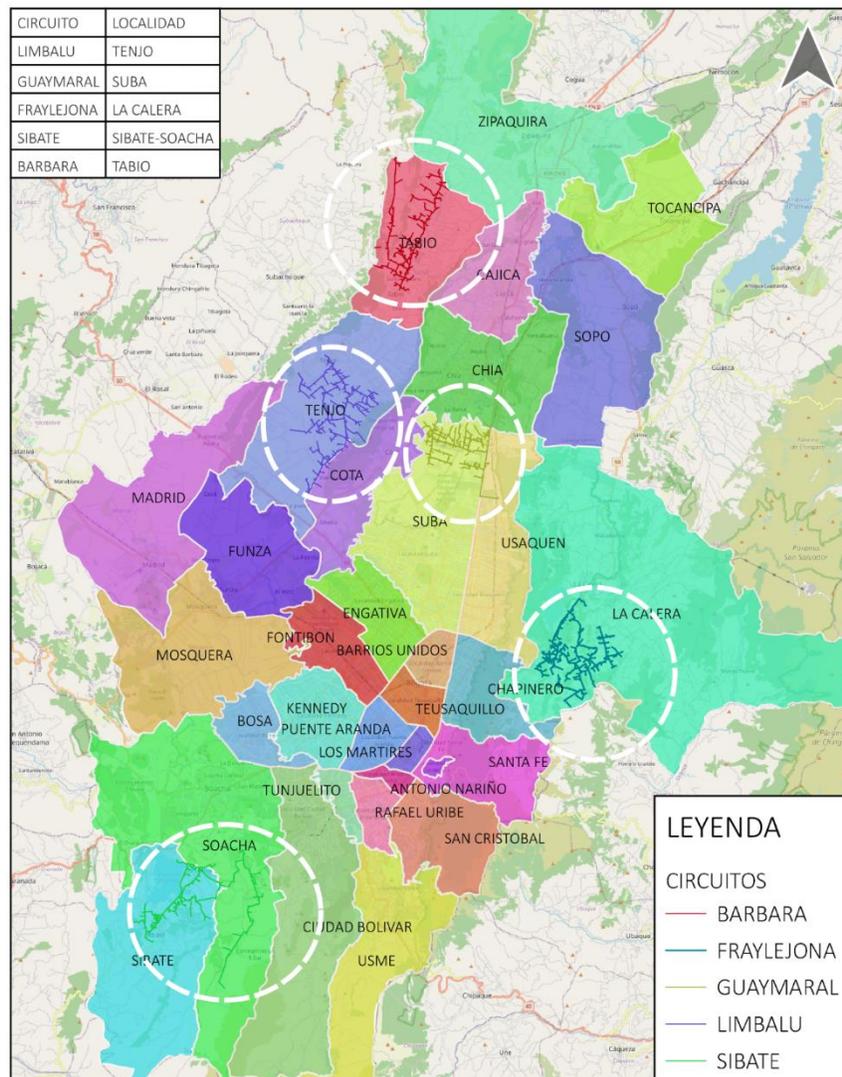


Figura 9 Ubicación de los circuitos seleccionados para el análisis.
Elaboración propia.

Los mapas de riesgo eléctrico que se obtuvieron luego del procesamiento en QGIS para cada uno de los circuitos analizados se muestran en las Figuras 9, 10, 11, 12 y 13. La información presentada en los mapas incluye toda la infraestructura eléctrica, además del tipo de configuración, ya sea aérea o subterránea. También se muestra el avance de ejecución a la fecha en que se realizó el análisis para comprender mejor los resultados obtenidos en los mapas de riesgo eléctrico. Es importante mencionar que la escala de colores indica la criticidad de cada zona o tramo del circuito, los tonos rojos indican mayor cantidad de medidas técnicas,

árboles pendientes y árboles ejecutados sobre la red, mientras que los colores azules una menor concentración de estos.

De lo circuitos analizados, el circuito Fraylejona es el que presenta mayor riesgo eléctrico, y esto se debe principalmente a que no se han realizado intervenciones forestales luego de que se realizó el levantamiento. Además de que tiene gran cantidad de zonas arborizadas pendientes de ejecución (Ver Figura 10). De acuerdo con el levantamiento forestal, de todas las actividades de manejo silvicultural que requiere más del 38% corresponde a zonas arborizadas con alrededor de 3739 m² que deben ser intervenidos, y más de 2000 podas y talas individuales. En comparación con el circuito Sibate que tampoco se ha intervenido, este último solo presenta un tramo de red con riesgo eléctrico considerable y se debe a una gran concentración de árboles en dicho punto (Ver Figura 11). Además, solo el 0,52% del total de individuos arbóreos en contacto con la red eléctrica requieren medida técnica, lo cual disminuye su criticidad en cuanto al riesgo eléctrico ya que la mayoría de las intervenciones forestales se pueden ejecutar.

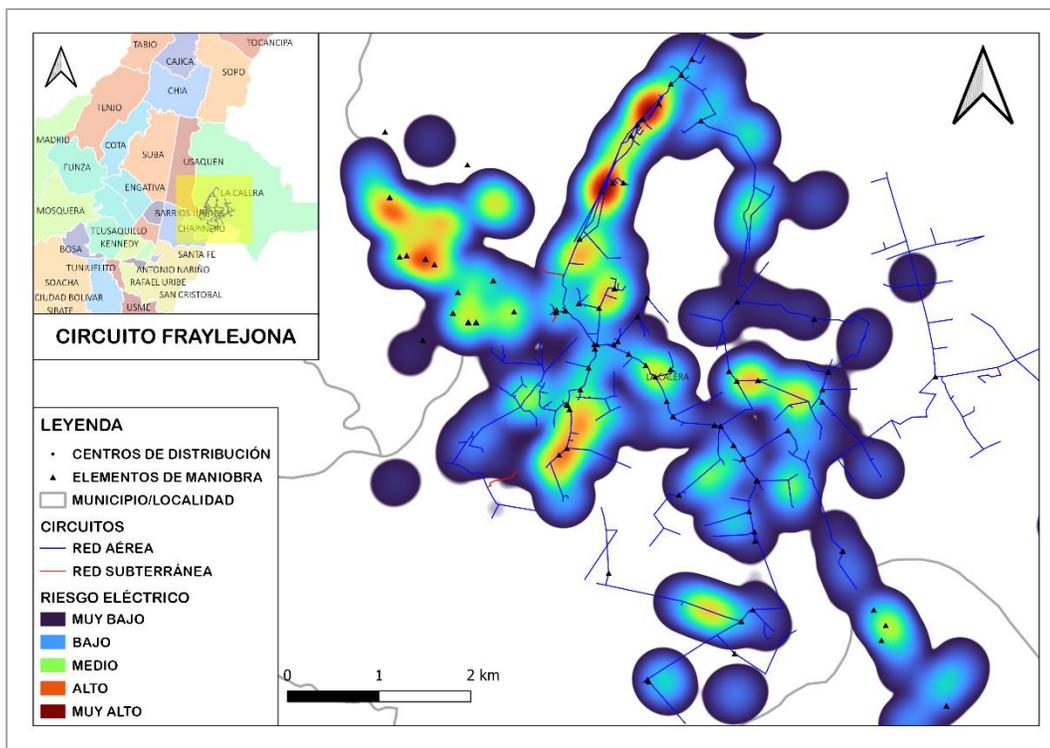


Figura 10 Mapa de riesgo eléctrico circuito Fraylejona

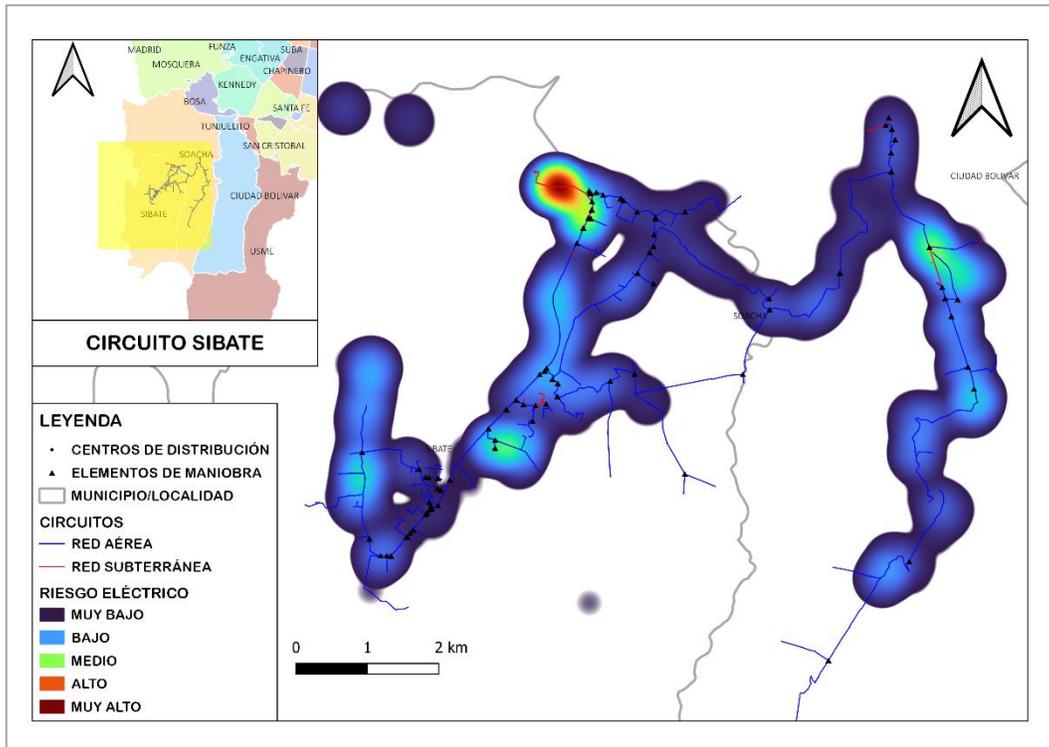


Figura 11 Mapa de riesgo eléctrico circuito Sibate

Por otra parte, el circuito con mayor avance ejecución a la fecha es el Guaymaral que se encuentra en suba, y tiene un porcentaje de ejecución del 66% de acuerdo con la información reportada en ForestOne (Ver Figura 12). Sin embargo, presenta varios tramos o puntos de la red con riesgo eléctrico, lo cual se debe a la gran cantidad de medidas técnicas que este circuito requiere en dichos tramos. Además de que las zonas arborizadas aumentan su criticidad, puesto que se deben ejecutar cerca de 14260 m². Otro de los circuitos que ha sido intervenido en mayor medida es el Barbara, con un avance del 56% (Ver Figura 13). Aun así, presenta riesgo eléctrico en la zona central de su trazado, y se debe principalmente a las especies en veda que se encuentran ubicados en dicha región, así como que la mayoría de los árboles están concentrados ahí.

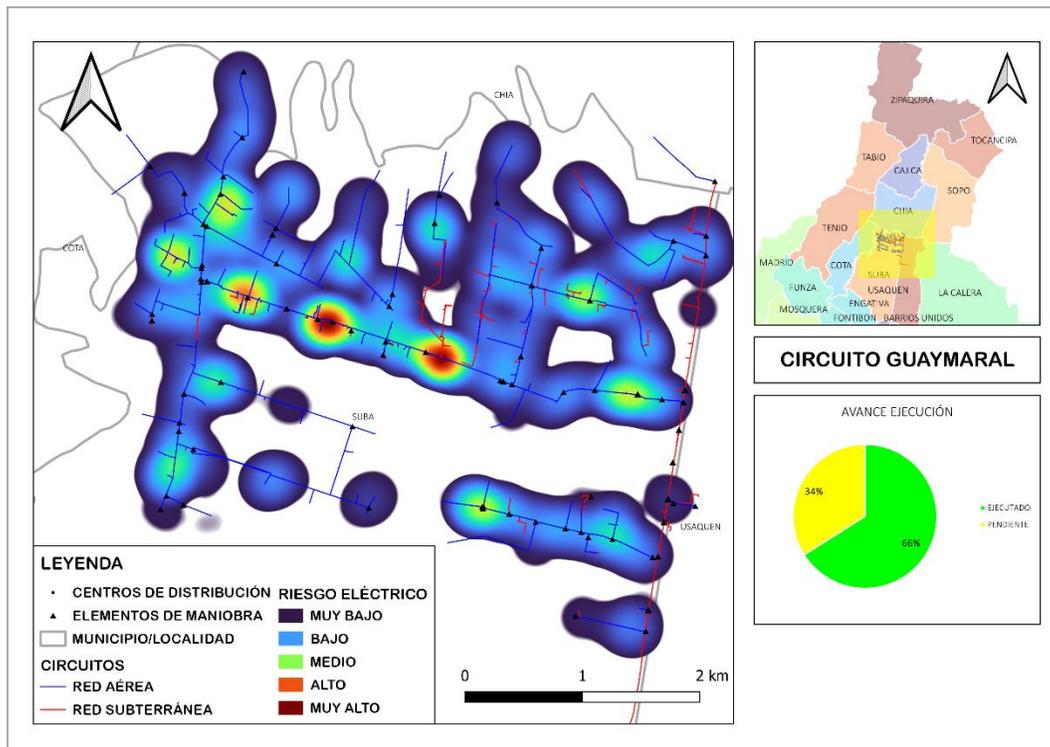


Figura 13 Mapa de riesgo eléctrico del circuito Guaymaral

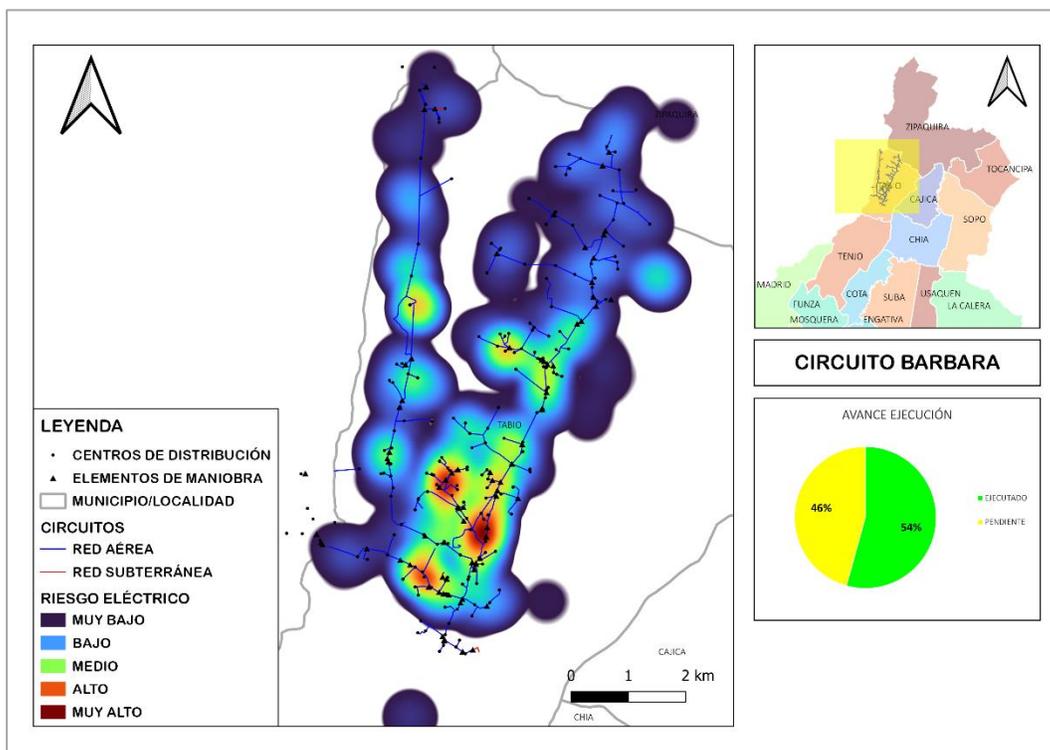


Figura 12 Mapa de riesgo eléctrico del circuito Barbara

Finalmente, el circuito Limbalu cuenta con un avance de ejecución del 18%, por lo que presenta varias zonas críticas debido a la gran cantidad de árboles que este circuito tiene en contacto con la red eléctrica, y a las 68 especies en veda que tiene concentradas en esos puntos. De acuerdo con la información levantada, alrededor del 50% de los árboles se encuentran en áreas arborizadas, las cuales también incrementan el riesgo eléctrico en ciertos tramos (Ver Figura 14).

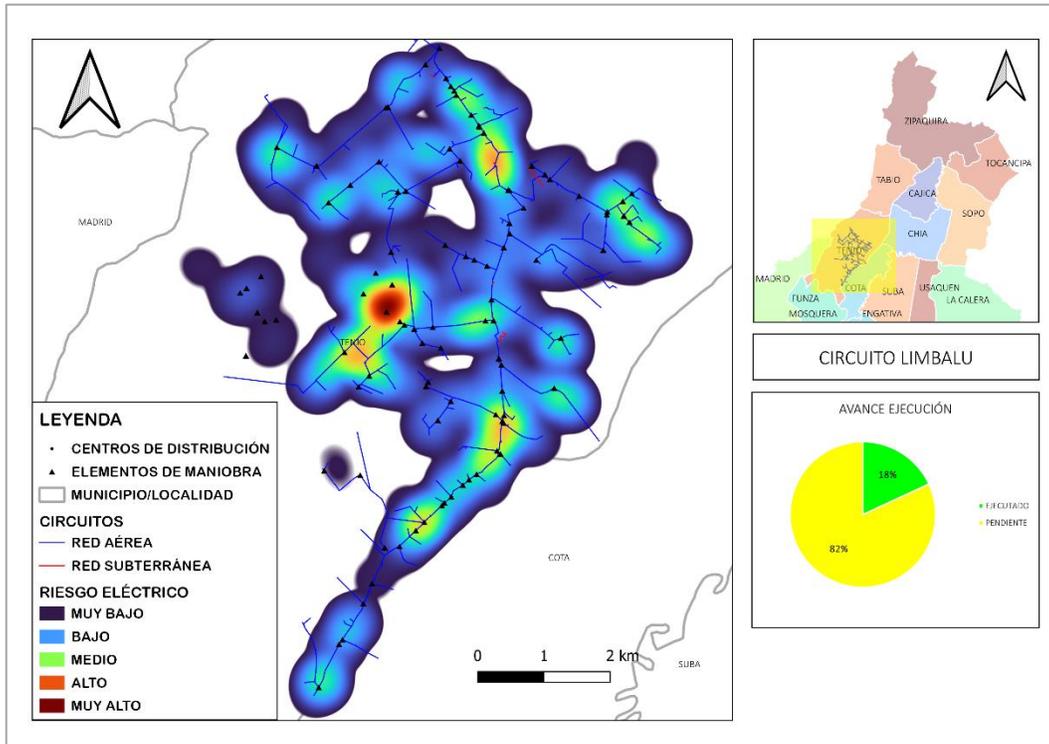


Figura 14 Mapa de riesgo eléctrico del circuito Limbalu

La otra parte del proyecto es el desarrollo del modelo predictivo de crecimiento de la vegetación. Del análisis y procesamiento de información se obtuvieron las especies más abundantes de los circuitos analizados, siendo el Pino Ciprés el más común con alrededor de 3333 individuos. Luego se encontraron la Acacia Negra, el Eucalipto y la Acacia Japonesa con 1365, 1274 y 1205 árboles, respectivamente. También, el Pino Patula, el Aliso, el Sauce y el Sauco se hallaron en grandes proporciones en estos circuitos. Sin embargo, de las especies con mayor cantidad de individuos, el Sauce es la que crece más rápido con 23.4 cm/mes, seguida de la familia de las Acacias con 19.5 cm/mes y luego el Eucalipto con 17 cm/mes (Ver Figura 15).



Figura 15 Especies más abundantes en los circuitos analizados

Luego de aplicar la ecuación definida para el modelo de crecimiento se encuentran cerca de 3342 árboles en “alerta roja” que deben ser intervenidos en menos de dos meses, debido a que se encuentran o están próximos a entrar en contacto con la red de distribución. No obstante, 8731 árboles cumplen la distancia exigida por la RETIE, esto es, los 2.7 metros. El resto de los individuos arbóreos deben ser ejecutados entre los próximos 2 a 12 meses para evitar que entren en interferencia con los conductores eléctricos, y de esta manera, reducir la probabilidad de fallas de este tipo (Ver Figura 16).

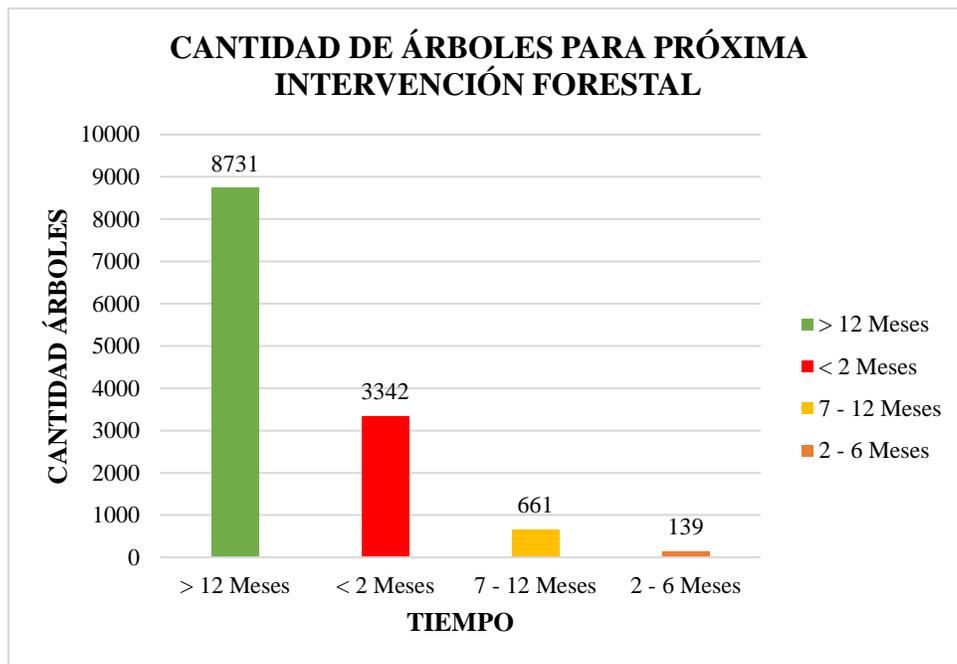


Figura 16 Cantidad de árboles por rango de tiempo que deben ser intervenidos en los próximos meses.

La representación gráfica de los resultados obtenidos del modelo de crecimiento, específicamente los datos relacionados con la fecha de la próxima intervención forestal se presentan a continuación para cada uno de los circuitos seleccionados.

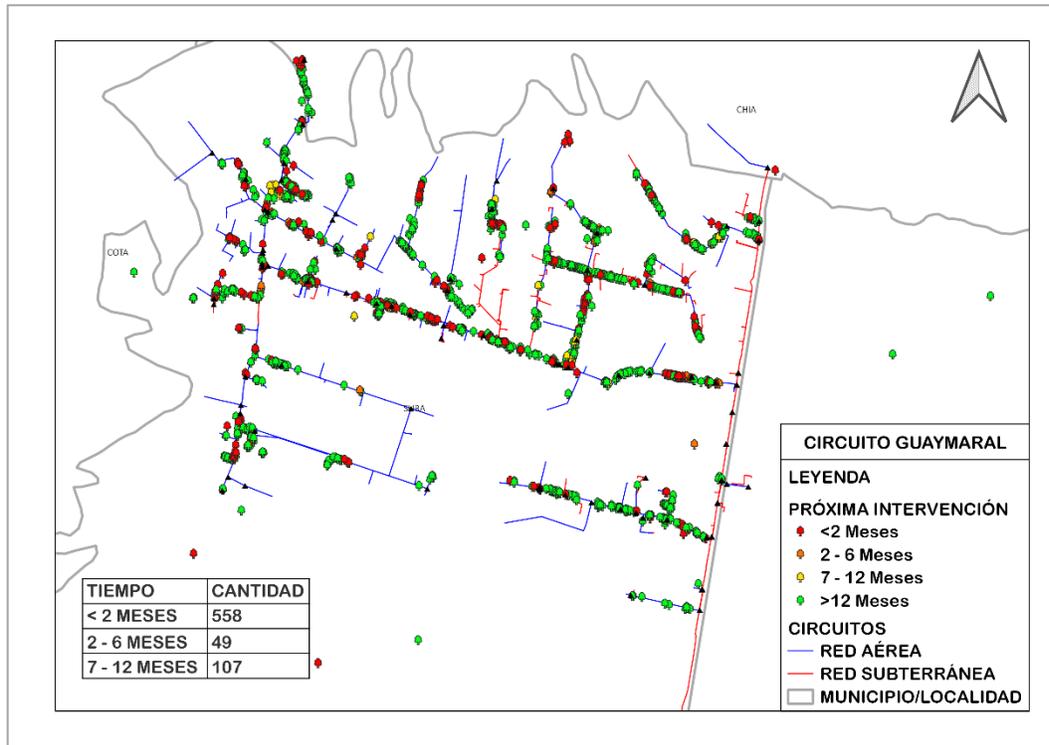


Figura 177 Frecuencia de intervención circuito Guaymaral.

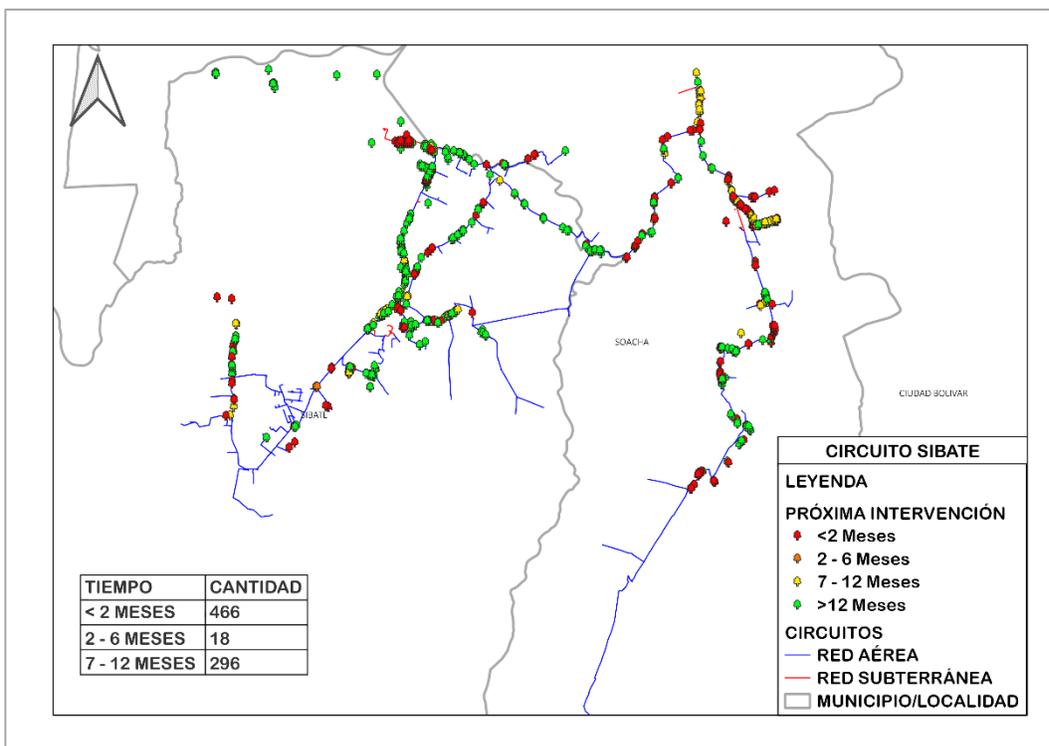


Figura 188 Frecuencia de intervención circuito Sibaté.

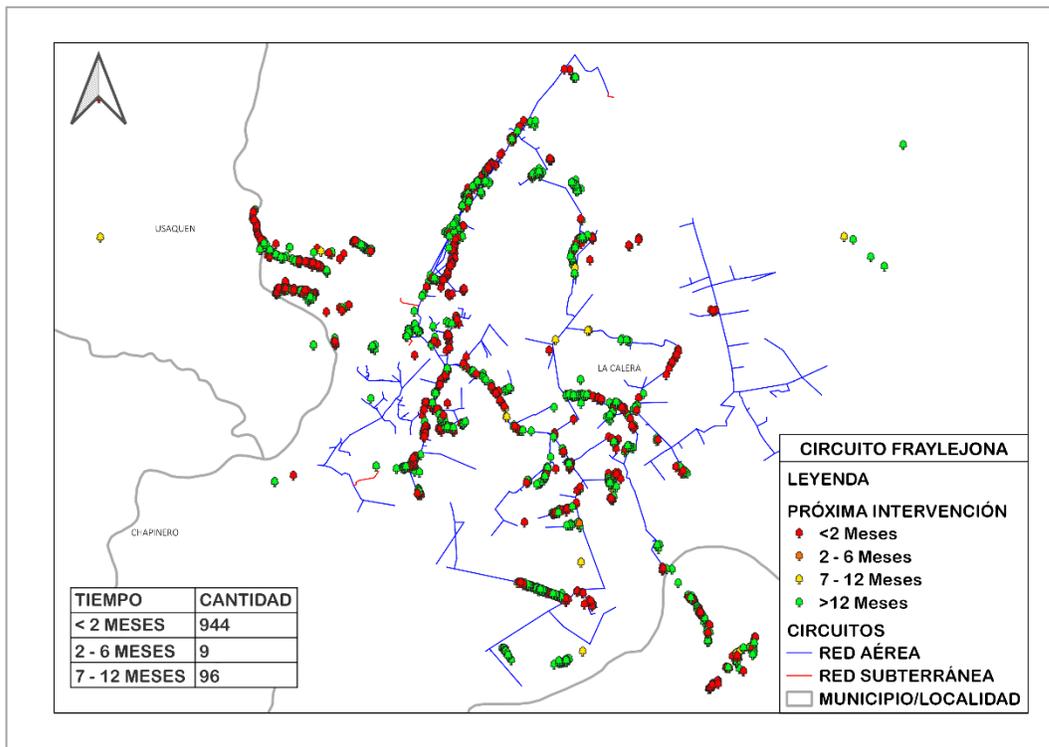


Figura 19 Frecuencia de intervención circuito Fraylejona

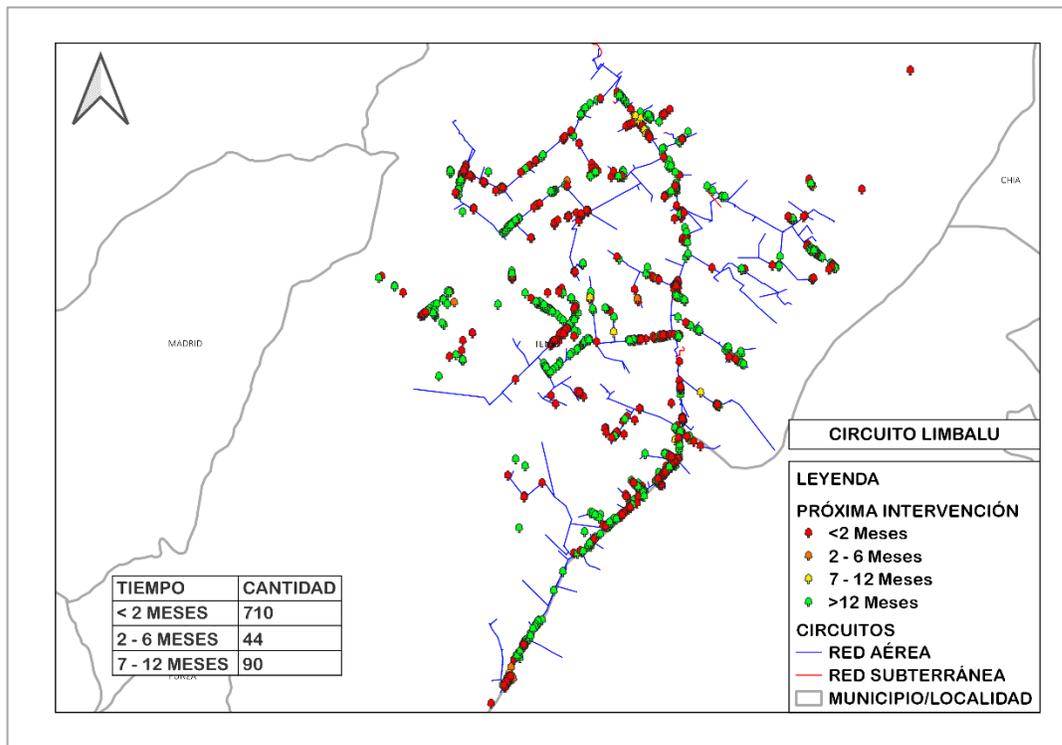


Figura 20 Frecuencia de intervención circuito Limbalu

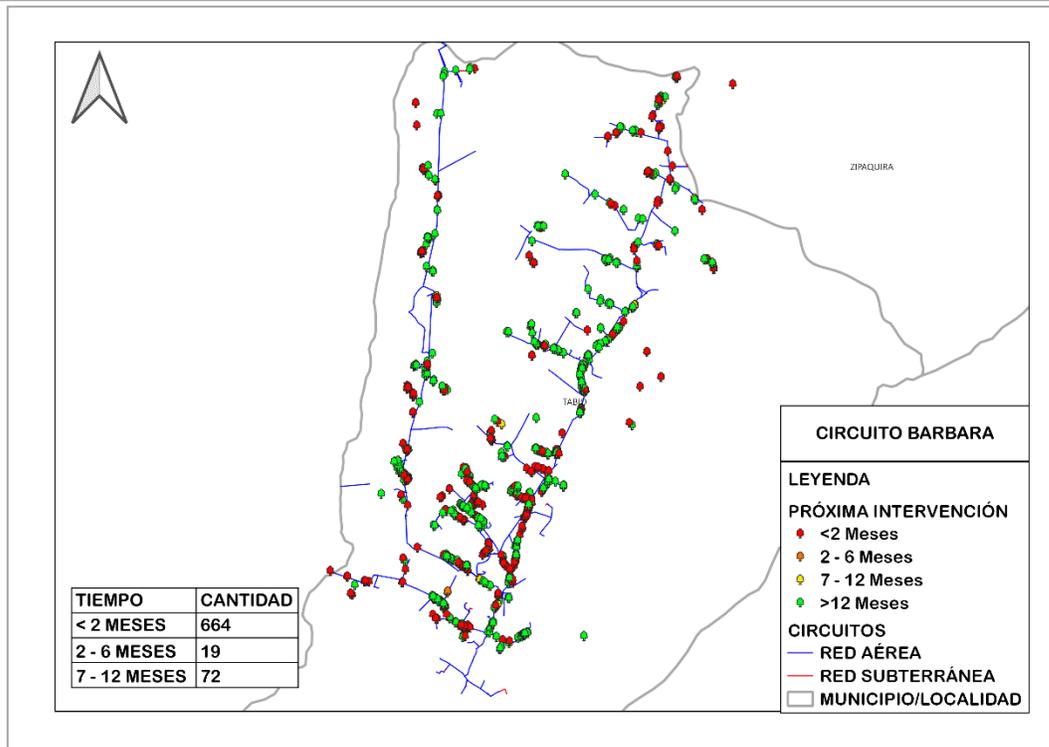


Figura 21 Frecuencia de intervención circuito Barbara

De los circuitos analizados, el Fraylejona es el circuito que requiere más intervenciones de manera inmediata puesto que 944 árboles se encuentran a una distancia crítica de la red. Esta situación era de esperarse debido a que desde su último levantamiento forestal no se ha intervenido ningún árbol. Otro circuito que requiere atención inmediata es el Limbalu, alrededor de 710 árboles se encuentran próximos a entrar en interferencia con los conductores eléctricos, y también se debe a su bajo porcentaje de ejecución, solamente el 18% del total de árboles inventariados se habían ejecutado a la fecha en que se realizó el análisis. En cuanto a los demás circuitos, estos requieren en promedio de 560 intervenciones forestales por circuito para antes de 2 meses, ya que los árboles en cuestión se encuentran en alerta roja por su cercanía a la red.

Concerniente a la cantidad de árboles que se encuentran fuera de la franja de intervención de Enel Colombia S.A ESP., es decir, a 2.7 metros de la red de distribución según el RETIE; el circuito Fraylejona aunque no se haya ejecutado en los últimos meses cuenta con 2467 árboles en cercanía a la red, pero cumpliendo con las distancias establecidas por la normatividad; y se debe a que los árboles levantados y que se encuentran en contacto con la red no se han reportado en ForestOne porque solo quedan registrados luego de que se hayan intervenido. Luego se encuentra el circuito

Guaymaral que tiene el 25% de los árboles a una distancia prudente de la red, y está relacionado con su avance en la ejecución forestal, puesto que se había intervenido en un 66%. El circuito Limbalu, Sibate y Barbara cuentan en promedio con el 16% de los árboles por fuera de la franja de intervención de Enel Colombia S.A ESP.

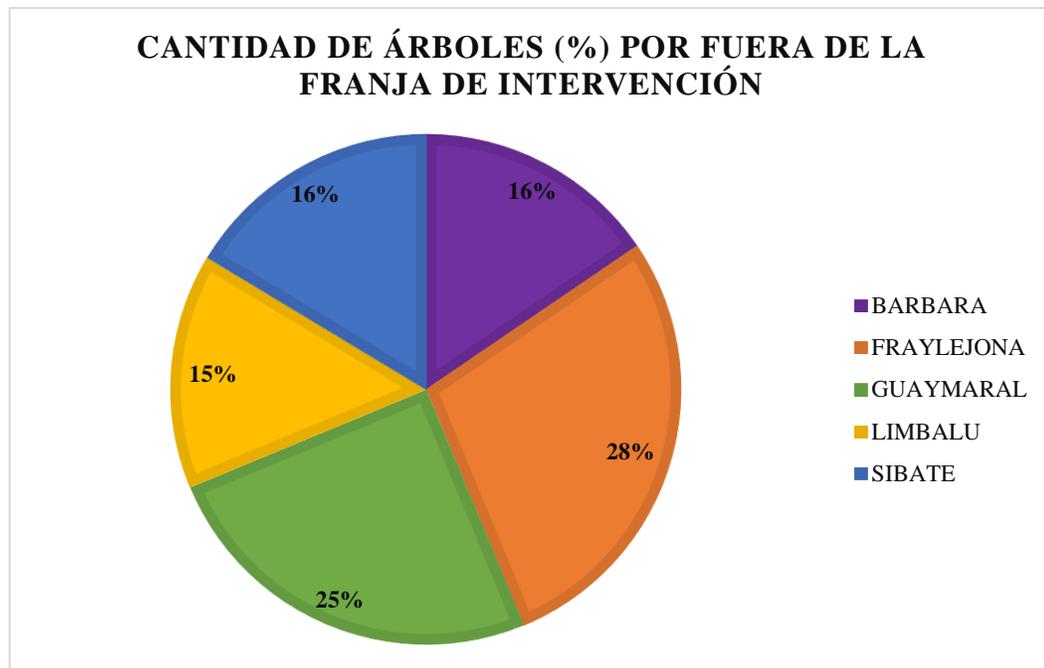


Figura 22 Cantidad de árboles (%) por fuera de la franja de intervención

El modelo predictivo de crecimiento de la vegetación se desarrolló con tasas de crecimiento asociadas a las condiciones ambientales promedio de la Zona Metropolitana de Bogotá D.C, aun sabiendo que existen microclimas a lo largo de toda su extensión. Según un estudio sobre la caracterización climática de Bogotá D.C realizado por el IDEAM, existen zonas semisecas, semihúmedas, ligeramente húmedas, moderadamente húmedas, húmedas, muy húmedas y superhúmedas; las cuales cuentan con características ambientales particulares, aun así, la temperatura media oscila entre 12 a 15°C en el área urbana, pero se puede llegar a 4°C en la zona rural. En cuanto a la precipitación esta cambia a lo largo de toda la zona metropolitana debido a que en el casco urbano llueve menos que en el resto de territorio, siendo además la parte suroccidental la más seca, mientras que la parte nororiental presenta lluvias que oscilan entre 142 mm y 126 mm en los meses lluviosos (IDEAM).

El crecimiento y desarrollo de los árboles depende de factores ambientales, características genéticas y la competencia por recursos. En cuanto a las variables ambientales la temperatura, la radiación solar y el tipo de suelo son los que mayormente influyen en el crecimiento de los árboles. Todos los procesos fisiológicos ocurren más rápidamente a medida que la temperatura aumenta hasta llegar a una temperatura optima, sin embargo, los árboles requieren más nutrientes, agua, radiación solar, etc. para poder mantener su nivel de metabolismo y evitar el estrés hídrico, que es el principal problema cuando se presentan altas temperaturas. En cambio, a temperaturas muy bajas el desarrollo es más lento y en el caso de producirse heladas se pueden generar daños en los tejidos jóvenes. Por otra parte, la radiación solar en exceso no es considerada un problema siempre y cuando estén disponibles agua y nutrientes, lo cual indica que su ausencia si afecta significativamente el desarrollo de los árboles (Silva, 2020).

Por otra parte, el tipo de suelo, en específico su PH, define la disponibilidad de unos u otros nutrientes, ya que en los suelos ácidos algunos nutrientes pueden volverse muy solubles y tóxicos, además, de que reducen la capacidad de la planta para absorber fósforo, calcio, magnesio y molibdeno. A la vez que lo suelos alcalinos bloquean la liberación de nutrientes como el fosforo y zinc, principalmente. También, la salinidad del suelo puede afectar el crecimiento de los árboles porque puede generar el taponamiento de los poros por donde circula el agua y el oxígeno.

Con respecto a las condiciones propias de los árboles, cada especie crece y se desarrolla de manera particular de acuerdo con sus características morfológicas y fisiológicas que son de carácter genético. Por ejemplo, el patrón de ramificación de la copa del árbol y la disposición de las hojas, que son factores morfológicos que varían con la especie, influyen significativamente en la cantidad de luz captada y ganancia de carbono. De esta manera, se evidencia que la genética influye en la forma en que como los árboles responden a los estímulos de su entorno, en la velocidad en que llevan a cabo la fotosíntesis y la transpiración, así como en la manera en cómo compiten con otros árboles por el espacio para crecer y los nutrientes disponibles (Gerez Fernández & Peters, 2016).

5. Conclusiones

El riesgo eléctrico se relaciona directamente con la cantidad de árboles en contacto con la red eléctrica porque es más probable que se produzcan fenómenos de electrocución e incendios cuando el contacto se da en varios puntos y permanece tiempo considerable, como es el caso, debido a que existen alrededor de 150.000 árboles en contacto con la red en la Zona Metropolitana de Bogotá D.C, y los planes de mantenimiento forestal ejecutados por Enel Colombia S.A ESP son anuales. Es por esta razón que las variables que se tuvieron en cuenta en el análisis fueron la cantidad de árboles ejecutados, árboles pendientes y medidas técnicas, puesto que al considerar que los tramos con mayor vegetación en contacto con la red y restricciones en su intervención, por tener especies en veda o podas drásticas, tienen mayor potencial de generar eventos riesgosos para los usuarios y el medio ambiente porque no se puede liberar el contacto rápidamente.

Por otra parte, la elaboración de los mapas de riesgo eléctrico permite identificar los tramos de red que deben ser priorizados en los planes de mantenimiento de las empresas prestadoras de servicio eléctrico, lo cual hace más eficiente el manejo silvicultural de Enel Colombia S.A ESP, dado que es posible dirigir el recurso hacia los puntos que requieren mayor atención por su criticidad, lo cual se traduce en una mejora significativa de los índices de calidad del servicio y en reducción en costos por atención de emergencias. Además de que permite visualizar la magnitud del riesgo que representa el contacto de los árboles con los conductores eléctricos para las personas y el entorno, facilitando de esta manera la toma de decisiones con respecto a las medidas que se van a tomar para mitigarlo. En cuanto al proceso forestal, los mapas de riesgo eléctrico organizan la información forestal de una manera gráfica, siendo más fácil comprender el estado de cada uno de los circuitos con respecto a la vegetación circundante, y conocer el avance de ejecución de los planes de mantenimiento del arbolado.

Las principales restricciones para el proceso de gestión forestal de Enel Colombia S.A ESP, son las impuestas por la normatividad ambiental, ya que algunas especies arbóreas no se pueden intervenir por estar catalogadas como vedas que deben ser conservadas. También está prohibido remover más del 30% de la copa del árbol por la afectación que esto provoca a su estado fitosanitario. Por tal motivo, es que se emplean cambios en la configuración de la red para resolver

el conflicto con los árboles sin afectarlos, garantizando de esta manera que sigan brindando sus servicios ambientales a la ciudadanía y el medio ambiente y que, a su vez, el servicio eléctrico sea continuo y confiable.

En cuanto a la creación de planes de mantenimiento eficientes, es necesario conocer la distribución y la frecuencia en que se van a realizar las intervenciones forestales. Los mapas de riesgo eléctrico permiten identificar los puntos que se deben intervenir y su distribución a lo largo de la Zona Metropolitana de Bogotá D.C. Mientras que el modelo de crecimiento de la vegetación brinda información sobre la frecuencia de intervención o específicamente sobre el tiempo que tardan los árboles en entrar a la franja de intervención definida por el RETIE, por lo que a partir de los resultados obtenidos es posible construir un cronograma de intervención forestal donde la prioridad sea intervenir los puntos más críticos de los circuitos, en relación con la densidad forestal, la distancia que se encuentran de la red eléctrica y el tiempo de la próxima intervención.

El problema de los árboles y la red eléctrica es que al compartir el mismo espacio generan un riesgo a las personas y al medio ambiente por la naturaleza de cada uno. Los árboles por su parte son seres dinámicos y complejos que brindan múltiples beneficios ambientales, mientras que la red eléctrica es generalmente estática y transporta corriente eléctrica de alto voltaje que es peligrosa para el ser humano y los elementos que entren en contacto con esta. Por lo tanto, para la resolución de dicho conflicto es esencial conocer los factores que influyen en el crecimiento de los árboles, el actor dinámico en este caso. Según diversos estudios, el desarrollo de los árboles depende de variables ambientales, de la genética propia de cada especie y de la competencia por los recursos disponibles. Por lo tanto, para saber cuándo se presentará el contacto de una manera acertada es primordial tener en cuenta el comportamiento de los árboles en distintos escenarios con condiciones particulares, y acorde a su especie. Esta variabilidad se cuantifica en la tasa de crecimiento forestal, con dicho dato es posible entonces determinar la altura óptima de intervención y el tiempo que tardaran los árboles en entrar en contacto con la red eléctrica, es decir, permiten definir la frecuencia de las ejecuciones forestales.

Referencias

- Alcaldía Mayor de Bogotá. (2018). leyex. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.leyex.info/documents/leyes/b2f7425579ec385092961912b5cb8989.pdf
- Almario, E. M. (2005). repositorio.uniandes.edu.co. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/10741/u262253.pdf?sequence=1
- American Psychological Association [APA]. (2020). *Publication Manual of the American Psychological Association* (7^a ed.). American Psychological Association.
- Arango, J. L. (2000). Enfermedades respiratorias del recién nacido. En J. A. Correa, J. F. Gómez, & R. Posada (Eds.), *Fundamentos de pediatría: generalidades y neonatología* (pp. 463–467). Fondo Editorial CIB.
- Baker, D. W., Gazmararian, J. A., Williams, M. V, Scott, T., Parker, R. M., Green, D., Ren, J., & Peel, J. (2002). Functional Health Literacy and the Risk of Hospital Admission Among Medicare Managed Care Enrollees. *American Journal of Public Health*, 92(8), 1278–1283. <https://doi.org/c7fvj5>
- Biblioteca Universidad de San Buenaventura [@BiblioUSB]. (2016, mayo 3). *Consulta Biblioteca Digital USB Colombia* [#Biblioteca #USBMed](http://bibliotecadigital.usb.edu.co/acceso_a_más_de_2.600_documentos_en_texto_completo) [tweet]. Twitter. <http://bit.ly/2MmUp88>
- El Espectador. (2012). Tutelas por un acetaminofén: tratamientos, medicamentos y cirugías, las mayores causas de reclamo. El 67,81% de los casos correspondían a servicios incluidos en el plan de beneficios. En *El Espectador*. <https://bit.ly/3mr4I8Q>
- Enel. (2022). Enel. Obtenido de enel.com.co/es/conoce-enel/enel-distribucion/innovacion-tecnologica.html
- Enel Codensa. (2020). Arbolado y consideraciones asociadas al riesgo eléctrico. Bogotá D.C.
- Fundación del Español Urgente [Fundéu]. (2012). *Fundéu BBVA: cómo diferenciar «si no» y «sino»*. <https://bit.ly/3oBTGP9>
- González Pérez, Y., Rosell León, Y., Piedra Salomón, Y., Leal Labrada, O., & Marín Milanés, F. (2006). Los valores del profesional de la información ante el reto de la introducción de las nuevas tecnologías de la información y la comunicación. *ACIMED*, 14(5). <https://bit.ly/2VgAbP7>
- Hooper, T. (2010). *El Discurso del Rey [The King's Speech]*. UK Film Council; See Saw Films; Bedlam Productions.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers [IEEE]. (2006). *IEEE Std P802.15.4/D6: Approved Draft Revision for IEEE Standard for Information technology-Telecommunications*

and information exchange between systems-Local and metropolitan area networks-Specific requirements-Part 15.4b: Wireless Medium Access Control. IEEE.

NANTES, E. A. (2019). The National University of Córdoba. Obtenido de <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/epio/article/download/26474/28219/78112>

International Business Machine [IBM]. (2020). *SPSS (Versión 27.0)* [software]. IBM.

Ramírez H., A., & Guzmán, P. (s.f.). *Sistemas participativos de garantía SPG en Bogotá: la apuesta del proceso organizativo Familia de la Tierra*. <https://bit.ly/3mfvktD>

Rioja, G. (2008). *¿Judicialización de la salud? el caso de las personas sordas* [conferencia]. XIII Congreso de la Caja de Abogados de la Provincia de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.

Ruiz Rojas, G. A. (2014). *Hacia la comprensión de la retórica como contenido formativo para la configuración de un sujeto deliberativo* [tesis de maestría, Universidad de San Buenaventura Medellín]. Biblioteca Digital Universidad de San Buenaventura Colombia.