

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Mutis	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 1 de 98	

ANÁLISIS E INTEGRACIÓN DE NUEVOS FACTORES DE AMENAZA DE
VOLCAMIENTO O FALLA DEL ARBOLADO URBANO, COMO MECANISMO PARA LA
GESTIÓN DEL RIESGO EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ

CESAR AUGUSTO PARRA ALDANA
Grupo de Investigación Aplicada STO - JBB

LILI TATIANA VEGA CLAVIJO
ANDRES HERNANDO VALENZUELA GÓMEZ
Coordinadores Grupo de Investigación Aplicada STO - JBB

GRUPO DE INVESTIGACIÓN APLICADA
SUBDIRECCIÓN TÉCNICO-OPERATIVA
JARDÍN BOTÁNICO JOSÉ CELESTINO MUTIS

	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 2 de 98	

BOGOTÁ D.C. 2022

	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 3 de 98	

TABLA DE CONTENIDO

1. RESUMEN

En la ciudad de Bogotá existe una población aproximada de 1.450.000 individuos arbóreos, arbustivos y palmas, que comprenden alrededor de 360 especies. Del total de las especies establecidas en el espacio público, 144 han presentado algún evento de falla o han provocado situaciones de emergencia, en un proceso que muestra un aumento considerable en la ocurrencia de este tipo de eventos a través de los años y con tendencia a aumentar en escenarios de cambio climático. Las causas y variables que intervienen en la falla de un árbol, siendo aún desconocidas para las condiciones particulares de la ciudad, en tanto que la definición de una condición de amenaza de falla de un árbol, sigue dependiendo de análisis visuales externos. Se plantean como propósitos de este trabajo, la definición y parametrización de nuevas variables internas y externas de árboles declarados en condición de riesgo y el análisis de un modelo que integre los diferentes tipos de evaluación. Se seleccionaron 32 individuos de las especies de *Acacia melanoxylon*, *Eucaliptus globulus* y *Cupressus lusitanica*, quienes presentan alta frecuencia de falla por volcamiento en la ciudad. El análisis de los modelos arroja relaciones significativas entre algunas de las variables provenientes del análisis visual externo de los árboles y el análisis interno de la madera del fuste, a partir de la aplicación de herramientas tecnológicas como la tomografía sónica. Se plantean nuevos elementos para la definición y parametrización de variables que pueden involucrarse en el análisis de la amenaza o peligro que presentan los árboles en el espacio urbano.

	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 4 de 98	

2. PALABRAS CLAVE

Gestión del riesgo, arbolado urbano, falla de árboles, volcamiento.

3. INTRODUCCIÓN

En la ciudad de Bogotá existe una población aproximada de 1.450.000 individuos arbóreos, arbustivos y palmas, que comprenden alrededor de 360 especies. Del total de las especies establecidas en el espacio público, 144 han presentado algún evento de falla o han provocado situaciones de emergencia, siendo las especies de Acacia, Eucalipto y Ciprés, las que presentan alta frecuencia de falla por volcamiento y las que representan un mayor potencial de afectación a la población, a los bienes y a los servicios de la ciudad, dadas las grandes dimensiones que alcanzan sus individuos en estado adulto. Para comprender las variables que pueden estar involucradas en la generación de un evento de falla, y mejorar la asignación de niveles de riesgo de volcamiento de árboles de gran porte, se plantean nuevos elementos para la definición de las fallas que pueden presentar los árboles en el espacio urbano, se evaluaron las características internas y externas de los individuos arbóreos declarados en riesgo, se analizó el sistema árbol-raíz-suelo a través de un modelo de regresión y se analizó la pertinencia de las relaciones existentes en el estado interno de un individuo arbóreo con su expresión visual externa a efectos de la evaluación silvicultural para su manejo. El estudio se planeó para desarrollar en 6 fases, a partir de la cuales se presenta en el siguiente documento los avances alcanzados en las fases 1 y 2 con la definición y parametrización de nuevas variables para la valoración visual externa, y su

	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 5 de 98	

correlación con la condición expresada por la madera a través de imágenes de tomografía y resistografía.

4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

4.1. Descripción del problema

Los bosques urbanos ofrecen una variedad de beneficios, tales como la mitigación del efecto isla de calor, la filtración de contaminantes del aire, el embellecimiento del paisaje urbano y la reducción de la escorrentía de aguas pluviales (Clark et al., 1997; Roy et al., 2012). La presencia del arbolado urbano tiene un valor tanto intrínseco como monetario (Ponce-Donoso y Vallejos-Barra, 2016), lo que les otorga un valor patrimonial a las ciudades (Reyes de la Barra, et al., 2018). Sin embargo, todos los árboles cerca de personas y propiedades presentan algún nivel de riesgo, en caso de que ocurra una falla total o parcial (Klein, et al., 2021). Es por ello que la Gestión de los espacios públicos con arbolado debe incluir un programa de prevención del riesgo.

En Europa y América del Norte, muchas leyes y reglamentos prescriben la responsabilidad por tener programas asociados al riesgo (Schmied & Pilleman, 2003). Estos programas también se ocupan de la evaluación de los riesgos de los árboles, que generalmente se expresan para tratar árboles "peligrosos". Un árbol es peligroso cuando existen defectos estructurales que pueden provocar la caída del árbol o de las ramas y cuando esta falla puede causar daños personales o materiales (Konijnendijk, et al., 2005, Pokorny, et al., 2003). La falla surge cuando el árbol o la rama no puede compensar las fuerzas a las que está expuesto el árbol en el entorno urbano. Para van Haaften (2021), la falla incluye el

	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 6 de 98	

vuelco de árboles (momento de vuelco máximo/crítico), además de la rotura de tallos y ramas. Las situaciones de riesgo del árbol se pueden controlar parcialmente, pero no se puede eliminar completamente sin suprimir cada árbol. Por ello, el desafío está en desarrollar una adecuada gestión con el fin de asegurar un nivel de riesgo aceptable (Tomao et al., 2015).

De acuerdo con Klein, et al., (2021), los estudios recientes se han centrado en las percepciones públicas y profesionales en torno al riesgo de los árboles (Koeser et al., 2020), las políticas y prácticas relacionadas con el riesgo (Jones et al., 2014), la gestión del riesgo de los árboles urbanos (Davison y Kirkpatrick, 2014), y el cálculo de daños a la propiedad en áreas urbanas (Van Haaften et al., 2016). Otras investigaciones han examinado los diversos componentes de los métodos de evaluación de riesgos de árboles utilizados comúnmente (Klein et al., 2016, Reyes de la Barra, et al., 2018), comparando los diferentes niveles de evaluación de riesgos (es decir, visual limitado, básico y avanzado) para determinar la probabilidad de falla (Koeser et al., 2017), como también la influencia del evaluador en los resultados de la evaluación de riesgos y las recomendaciones de mitigación (Koeser y Smiley, 2017).

El potencial de que los árboles fallen se relaciona con varios factores biomecánicos y físicos. Sin embargo, parece haber una ausencia de métodos de evaluación de riesgos de los árboles respaldados por observaciones, a pesar de la creciente disponibilidad de variables y parámetros medidos por científicos, arbolistas y profesionales. En la literatura no existe un entendimiento, modelo o función comúnmente compartido disponible que exprese la distribución conjunta de los factores que explican la falla del árbol (van Haaften

Página 6 de 98

	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 7 de 98	

et al., 2021). La amplia gama de factores dispersos junto con el bajo número de estudios y tamaños de muestra informados para cada factor complica las estimaciones del potencial de falla de las especies en función de las características de los árboles y los factores externos (van Haaften et al., 2021). Las evaluaciones actuales del riesgo de los árboles urbanos varían debido a las diferencias en la experiencia, la capacitación y las opiniones personales de los evaluadores. De hecho, una revisión reciente de 161 artículos científicos relacionados con factores que influyen en la falla de los árboles incluídas las relacionadas al tallo, la raíz y las ramas, revelaron 142 factores diferentes (van Haaften et al., 2021). Esto enfatiza la necesidad contar con un método o procedimiento más objetivo para evaluar la peligrosidad de los árboles urbanos (van Haaften, et al., 2021).

El Manual de Coberturas Vegetales de Bogotá (2020) señala que el manejo silvicultura del arbolado adulto está enfocado en cuidar el estado físico y sanitario de los individuos como principal estrategia en la prevención del riesgo de caída de ramas y volcamiento, y por ello se direcciona en cuatro líneas principales: i) Manejo fitosanitario, ii) Manejo integral, iii) cirugía y iv) Poda (JBB, Universidad de Los Andes, 2020), Dentro de éstas líneas, la gestión del riesgo es abordado de manera específica al establecer medidas como la sustitución de árboles muy viejos y con daños estructurales severos, o la poda como medida necesaria para la prevención del riesgo cuando éstas son ejecutadas de manera técnica.

Para la ciudad de Bogotá se han adelantado algunas iniciativas para la modelación del riesgo con propósitos de prevención, siendo el Modelo biometeorológico generado por la Secretaría de Ambiente en 2019, el único que ha a través de herramientas de análisis relacional espaciales y alfanuméricos, ha avanzado en la inclusión de variables asociadas

Página 7 de 98

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Muta	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 8 de 98	

propiamente al individuo, las características de su entorno y su relación con condiciones meteorológicas (Velandia, et al., 2020). El desarrollo de este modelo determinó tres niveles de riesgo para todo el conjunto de árboles existentes en la ciudad (2.416 fueron establecidos como de riesgo alto), y un aplicativo en línea denominado calculadora de riesgo, con la cual se puede estimar la probabilidad de volcamiento por individuo (Velandia, et al., 2020).

En otro estudio realizado para la identificación de individuos arbóreos con susceptibilidad al volcamiento, se identificaron las especies más susceptibles al volcamiento por grupo de riesgo, mediante el uso de tres criterios: las alturas promedio, el tipo de especie y el tipo de emplazamiento donde ocurre con mayor frecuencia eventos de volcamiento. Como resultado de este modelo, se establecieron tres niveles de prioridad, indicando la existencia de 2.657 individuos arbóreos susceptibles al volcamiento de un universo de 1.205.460 árboles en la ciudad de Bogotá (Guevara, 2014).

En el modelo generado por Velandia, et al., (2020), se señala la ausencia de información espacial de los individuos cercana al 49%, que requieren nuevos procesos para la consecución de la información. Aun así, los procesos de actualización de la información siguen siendo limitados para establecer mejores predicciones en la identificación de los niveles de riesgo presentados por los individuos. En este sentido, se plantean cuestiones sobre si la inclusión o ajuste de variables al modelo existente puede mejorar la predicción del riesgo y si la integración de información reciente de los eventos de volcamiento en la ciudad de Bogotá, permite optimizar los instrumentos sobre los cuales se evalúa el riesgo de falla en el arbolado urbano.

	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 9 de 98	

4.2. Formulación del problema

El proceso actual de gestión de información del arbolado urbano de Bogotá, y otros modelos de colección de datos existentes en la ciudad, no permiten una oportuna gestión de la información para establecer con una mayor certeza, el nivel de amenaza o peligro que pueden representar los árboles en la generación de fallas estructurales y la consecuente materialización de una situación de riesgo, acarreando con ello, importantes consecuencias en la vida, bienes y funciones dinámicas que se desarrollan en el entorno urbano. Se requiere entonces de una valoración más precisa y actualizada de las condiciones de los individuos y de su entorno, de manera que facilite los procesos de gestión y planeación de las intervenciones silviculturales destinadas a la mitigación del riesgo. En ese sentido, se plantea que del uso de diferentes instrumentos y procedimientos que incorporen nuevas tecnologías y un conocimiento más detallado del estado de los árboles y de su entorno pueden facilitar la gestión con miras al conocimiento, la prevención y mitigación del riesgo ocasionado por la falla de árboles en el entorno urbano.

4.3. Delimitación espacial y temporal

El trabajo de formulación y aplicación de nuevas herramientas para la valoración del riesgo de falla del arbolado, se realizará a partir de la valoración visual externa e interna de individuos arbóreos localizados en el espacio público de uso público de la ciudad de Bogotá, durante un periodo de cinco meses.

5. JUSTIFICACIÓN

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Muta	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 10 de 98	

La gestión del arbolado urbano es un proceso complejo que va desde la planificación de las áreas verdes para el establecimiento de árboles, su manejo en estadios juvenil y adulto, y en general, la conservación de los individuos con miras al mantenimiento de sus funciones y la prestación servicios ecosistémicos asociados. Dentro de estos procesos, la gestión del riesgo del arbolado adulto se constituye como una necesidad apremiante, ante el aumento en la ocurrencia de eventos de falla de los árboles que tienen el potencial de afectar la vida y bienes de las personas. En la actualidad, la gestión del arbolado urbano debe incorporar acciones específicas que incluyan el enfoque del riesgo para conocer, manejar y en lo posible, reducir la potencial ocurrencia de eventos de falla que comprometen los bienes y la vida de los habitantes de la ciudad, como también su funcionalidad como centro urbano.

A pesar que se han adelantado avances importantes en el análisis de riesgo a través de la generación de modelos, como el generado por la Secretaría de Ambiente de Bogotá, SDA (2019), se han identificado algunos vacíos en estos procesos, que generan la necesidad de incorporar nuevos conceptos, herramientas tecnológicas y procedimientos que permitan una mayor precisión en la distinción de los diferentes niveles de amenaza que pueden representar los árboles en el espacio urbano. Para ello se requiere de la evaluación de la condición física y sanitaria de los árboles a partir del uso de estrategias complementarias, en conjunción con la valoración de condiciones del entorno y factores climáticos.

De otra parte, modelos previamente formulados por el Jardín Botánico de Bogotá y por la academia han propuesto mecanismos de análisis del riesgo incluyendo solo algunos de los aspectos intrínsecos de los árboles adultos existentes en la ciudad, sin la integración de las

	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 11 de 98	

variables extrínsecas que podrían estar potencializando la ocurrencia de eventos de falla en los individuos establecidos en la ciudad.

Con el incremento en la edad de los árboles, las afectaciones acumuladas por las intervenciones efectuadas, su interacción con el entorno de la ciudad y con sus habitantes, la vulnerabilidad de los individuos a presentar una falla, se acrecienta con el paso del tiempo. En tal sentido, se hace necesario contar con mejor información para el conocimiento del riesgo para adelantar labores de manejo apropiadas que redunden en su apropiado manejo. Es por ello que a partir de las experiencias adquiridas en los diferentes procesos de manejo de la infraestructura verde de las ciudades y los diferentes instrumentos generados para el conocimiento del riesgo generado por la falla de árboles, se hace necesario desarrollar acciones que procuren mejorar los modelos predictivos del riesgo, mediante la identificación de los diferentes tipos de falla que presentan los árboles, los mecanismos de valoración de la amenaza generada por estas fallas, y la generación de modelos acordes a la condición resultante de la interacción entre el árbol, su entorno y los factores climáticos.

La valoración de los distintos factores que potencian la generación de fallas en los individuos arbóreos localizados en la ciudad de Bogotá se constituye como una herramienta ineludible en la gestión de la infraestructura verde de la ciudad, en la que la implementación del enfoque de prevención, permita la conservación adecuada de la masa arbórea de la ciudad.

6. OBJETIVOS

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE <i>Jardín Botánico José Celestino Muta</i>	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 12 de 98	

6.1. Objetivo General

Evaluar la condición de amenaza de volcamiento o falla de árboles urbanos mediante la incorporación de nuevas variables y procedimientos al proceso de gestión del riesgo en la ciudad de Bogotá.

6.2. Objetivos Específicos

- Realizar un análisis retrospectivo de los elementos o variables posiblemente involucradas en la generación de eventos de volcamiento o falla de árboles en la ciudad.
- Describir y conceptualizar los diferentes tipos de falla que se presentan en el arbolado urbano de Bogotá
- Identificar nuevas variables en el análisis de amenaza de volcamiento o falla de los árboles localizados en el espacio público urbano.
- Evaluar la condición de amenaza para tres especies consideradas en alto riesgo por parte de los modelos de riesgo generados para la ciudad de Bogotá.

7. MARCO TEÓRICO, CONCEPTUAL O DE REFERENCIA

La infraestructura verde de las ciudades está compuesta por una diversidad de elementos que aproximan a los habitantes de las grandes urbes a entornos naturales generadores de múltiples niveles de bienestar al ser capaz de disminuir los efectos rudos que genera la infraestructura gris y permitir la oferta de múltiples espacios que

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Mutis	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 13 de 98	

contribuyen a la sostenibilidad dentro del territorio. El arbolado urbano, como elemento constitutivo de la infraestructura verde y las cuestiones asociadas a su establecimiento, conservación y manejo para la provisión de servicios ambientales en las áreas urbanas genera una nueva necesidad de conocimiento, dada la importancia que éstos generan en el entorno y sus habitantes. Sin embargo, con el crecimiento de la ciudad, los procesos de arborización y su manejo, exigen una gestión basada en el conocimiento, donde la evaluación del riesgo, representa un tema complejo e incierto, dadas las interacciones que pueden darse entre los árboles, el entorno y la dinámica de una ciudad.

Van Haften et al (2021) plantea la amplia oferta de información relacionada a las variables que pueden influir en el riesgo de los árboles urbanos, donde la información cualitativa de los evaluadores es sumamente importante para dar un criterio de riesgo, sin embargo, muchos de estos caen en la subjetividad sin lograr un “tamaño de efecto” como lo llama el autor, sin llegar a lograr ser parametrizadas de tal forma que permitan valorar la importancia de las mismas.

La evaluación visual, por ejemplo, fue y es en la actualidad uno de los instrumentos más relevantes para la evaluación de daños que pudiesen más tarde generar eventos de falla, desarrollado por Mattheck y Breloer (1994) esta metodología ha permitido desde su presentación la identificación de algunos defectos desde las cavidades o rajaduras relacionadas con el fuste, hasta la afectación por el posicionamiento de las raíces.

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE <i>Jardín Botánico José Celestino Mutis</i>	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 14 de 98	

Por otro lado, Van Haften et al (2021) también resalta la importancia de las variables dasométricas altura del fuste y el diámetro a la altura del pecho (DAP), y con estas la estimación de la esbeltez, estando está ampliamente relacionada con la frecuencia de falla.

España y Perú son algunos países que también han estudiado y probado algunas metodologías y factores variables para la evaluación del riesgo, La Alcaldía de Torrelodones, municipio del noroeste de Madrid, España, posee un sistema de evaluación del riesgo del árbol compuesto por 62 variables de las características del mismo, donde un 70% de estas, están dispuestas de forma cualitativa y además de esto no se presenta de forma estandarizada el procedimiento para la toma de las mismas, entre estas algunas de las más relevantes fueron copa descompensada e historial de poda . En concordancia con lo anterior Durand (2017) presenta condiciones muy similares en su estudio, sin embargo, éste posee 11 variables de las cuales presenta la parametrización de las mismas entre estas encontramos que la altura y las raíces tienen una importancia significativa. Por último, Mendoza (2018) incorpora el uso de la tomografía sónica en su estudio de riesgo, siendo un precedente importante para el presente estudio.

En estudios más cercanos y propios de la ciudad de Bogotá, Guevara (2014) realizó un modelo a partir de las variables de especie, altura, emplazamiento, pudrición o gomosis e inclinación, a partir de las cuales predijo el riesgo de algunas especies ubicadas en el espacio público. Sin embargo, dicho estudio se limitó a un grupo de especies, basado únicamente en la frecuencia de falla por volcamiento y a algunas variables de tamaño,

Página 14 de 98

	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 15 de 98	

sin incluir variables climáticas. Por su parte, Velandia et al (2022) auspiciado por la Secretaría Distrital de Ambiente presentó un modelo de riesgo a través del cual se establecieron nueve (9) variables, que incluyen variables climáticas (Precipitación y Viento) y variables asociadas al árbol.

Este modelo basado en el principio de redes neuronales presentó como variables más relevantes en la estimación del riesgo, el ángulo de inclinación y la altura total, sin embargo este modelo no publicado, no permite acceder a la batería de variables, ni a la forma de estimación de los pesos asignados a cada variable, con miras a su optimización, considerando que el único instrumento a través de la cual se determina un nivel de riesgo de cualquier árbol, presenta algunas inconsistencias, que no es posible ajustar, constituyéndose como una “caja negra” que no permite un análisis del funcionamiento del modelo y una posible optimización. Dentro del modelo, la inclusión de variables asociadas a las condiciones climáticas resultó tener el menor peso dentro del grupo de variables seleccionadas para la estimación, pero constituye un esfuerzo significativo en la integración de variables de distinto origen en el cálculo de un nivel de riesgo de falla de los árboles en entornos urbanos.

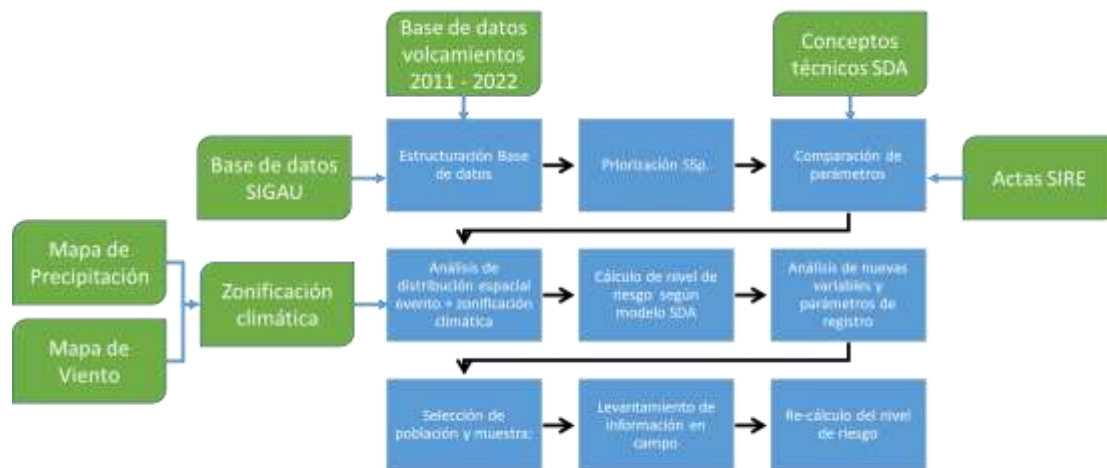
Las variables climáticas según lo propuesto por Van Haften et al (2021) y Velandia et al (2022) pueden resultar en variables significativas, sin embargo, en el presente documento no se realizará referencia a estas debido a que estas se incorporarán en otra etapa de la investigación, conforme se avance en el cálculo de fuerzas que actúan en los árboles a partir de la aplicación de modelos biomecánicos (en estudio).

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Muta	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 16 de 98	

8. METODOLOGÍA

La investigación se desarrollará en el área urbana de Bogotá Distrito Capital, a partir de la información registrada en las diferentes bases de datos que conforman el Sistema de Información Geográfica del Arbolado Urbano (SIGAU), haciendo un análisis retrospectivo de los eventos de volcamiento de árboles en la ciudad desde el año 2011 al 2022 y desarrollando un análisis de caso específico con los árboles sobre los se ha valorado previamente una condición de riesgo o riesgo potencial (por volcamiento o desrame), por parte de las entidades competentes que determinan aplicar la medida de tala. El procedimiento propuesto para desarrollar la investigación se presenta en la Figura 1.

Figura 1 Propuesta metodológica



A partir de la información compilada con reporte histórico de volcamientos ocurridos en la ciudad, se efectuará un cruce con las bases de datos SIGAU (incluyendo la información de

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Muta	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 17 de 98	

árboles inactivos). Del cruce de información espacial con la información alfanumérica se determinarán las especies con mayor frecuencia relativa de volcamiento y se comparará con la probabilidad asignada por el modelo de biometeorológico de riesgo generado por la SDA (Velandia, et al., 2019). Los individuos que no cuenten con código SIGAU en el reporte de volcamiento serán considerados en la medida de que éstos cumplan con los mínimos de información requeridos para el análisis.

Para las 10 especies sobre las cuales se determinó una mayor frecuencia relativa de falla por volcamiento en el análisis retrospectivo, se relacionarán los atributos biométricos y del entorno que aparecen registrados en las bases de datos del SIGAU únicamente para las especies que fueron reportadas como eventos de emergencia, sean estos provocados por volcamiento o por otro tipo de fallas como caída de ramas. Se efectuará un análisis de frecuencias con relación a las variables que tienen asignado un mayor peso en el modelo biometeorológico de riesgo generado por la SDA (ángulo de inclinación, altura total, emplazamiento y altura de copa).

Para las especies seleccionadas y a partir de los datos registrados en el SIGAU, se realizará una verificación del nivel de riesgo reportado por la calculadora. Posteriormente, se contrastarán la información de variables dasométricas, de emplazamiento y fitosanitarias reportados en el SIGAU, con los datos registrados en su momento en los conceptos técnicos emitidos por la SDA, o las actas levantadas en el proceso de atención establecido por el Sistema de Información para la Gestión del Riesgo y Cambio Climático SIRE. A partir de la información contrastada, se generará una base de datos para efectuar un análisis del cambio ocurrido entre la información reportada por el SIGAU con la información reportada

Página 17 de 98

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Muta	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 18 de 98	

por el Concepto Técnico o Acta del SIRE, prestando especial atención a la información relacionada con las variables dasométricas del individuo y los cambios o transformaciones ocurridas en su entorno.

Para todos los reportes de eventos de volcamientos, se efectuará un análisis de precipitación rezagada hasta cinco días previos a la ocurrencia del evento y se determinará los niveles de asociación o correlación del factor climático con el evento. Para el caso del factor climático velocidad del viento, se realizará un ejercicio de correlación con variables simples o compuestas reportadas para los árboles volcados (velocidad máxima del viento, velocidad máxima del viento + lluvia, solo lluvia). El análisis climático seguirá la metodología establecida en el análisis de riesgo biometeorológico formulado por la SDA, con la inclusión de la información hasta la fecha más reciente de reportes de eventos de volcamiento o falla.

A partir de la generación de mapas mensuales de precipitación y vientos, se generará un análisis de la frecuencia de volcamiento en relación con las unidades climáticas establecidas para cada factor climático individual (precipitación o viento) o asociado (precipitación y viento). En caso de hallar alguna asociación, se integrará a los análisis variables asociadas al tipo de emplazamiento.

A partir del análisis de la condición de los individuos pertenecientes a los parámetros de evaluación, se determinará la necesidad de incluir o no nuevas variables o parámetros de valoración de las variables existentes. Para ello se realizará una comparación de variables reportadas para los árboles pertenecientes a las especies priorizadas versus variables

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Mutis	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 19 de 98	

reportadas por publicaciones relacionadas al concepto de riesgo, con lo cual se generará una propuesta de definición y parametrización de variables.

Con las variables seleccionadas, se realizará una prueba de levantamiento y actualización de información. Para ello se realizará un complemento a la información proveniente de la base de datos de conceptos técnicos de la SDA relacionados con tala, con la información registrada en el SIGAU para los árboles sobre los cuales recaen tales conceptos. Para los árboles seleccionados, se verificará el nivel de riesgo asignado por el modelo biometeorológico generado por la SDA, con el propósito de clasificar los árboles según el nivel de riesgo. Se aplicarán los filtros relacionados con las variables de mayor peso en el análisis de riesgo efectuado por la SDA de la siguiente forma: árboles de mayor grado de inclinación, altura total del árbol, tipo de emplazamiento y altura de copa. Finalmente se seleccionarán las tres especies con mayor frecuencia relativa en la generación de eventos de falla y gran potencial de impacto negativo en caso de que éste ocurra, que cuentan con información relacionada a las variables de mayor peso y que están presentes en las áreas resultantes de la zonificación climática que presentan los mayores niveles en cada uno de los parámetros para el mes más representativo.

8.1. Definición de la población de estudio y muestra

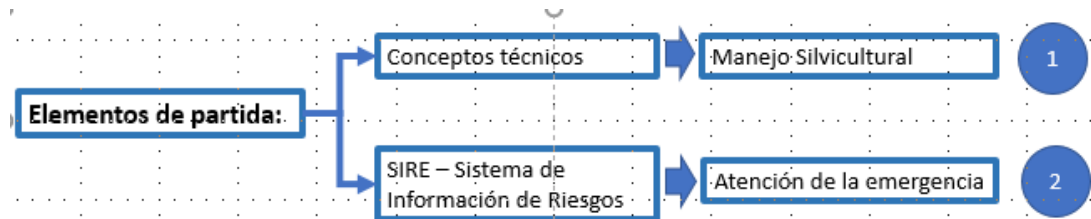
A partir de la identificación del TOP 10 de las especies con mayor frecuencia de falla, y la selección de tres especies de interés, se realizó una gestión con el equipo del área de arbolado adulto de la Subdirección Técnica del Jardín, logrando obtener el listado de árboles que cuentan con autorización para su manejo silvicultural de tala y el listado de árboles que están reportados por su condición de riesgo, y cuya competencia de manejo a

Página 19 de 98

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Mutis	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				 BOGOTÁ JARDÍN BOTÁNICO DE BOGOTÁ
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 20 de 98	

través de tala fue designada al Jardín Botánico. De esta forma se obtuvieron dos fuentes de información con reporte de árboles en riesgo para la construcción de la base de datos de árboles objeto de estudio asociado a las tres especies priorizadas (Figura 2)

Figura 2 Información de partida para la identificación de árboles objeto de estudio



A partir de las bases de datos obtenidas, se tiene que existen 1.865 registros de árboles notificados al Jardín Botánico, sobre los cuales existen cuatro (4) tipos de conceptos para su manejo. Estos conceptos se dividen en: tala, tratamiento integral, poda radicular y bloqueo y traslado, según los casos reportados. La distribución de registros según estas categorías y la fuente que lo determina se relacionan en la Tabla 1.

Tabla 1. Relación de individuos arbóreos objeto de manejo por silvicultural por riesgo

TIPO DE CONCEPTO	NOTIFICADOS POR ÁRBOLES	NOTIFICADOS POR CONCEPTO TECNICO	NOTIFICADOS POR EMERGENCIAS	TOTAL
TALA	642	306	534	1.482
TRATAMIENTO INTEGRAL	312	60	0	372
PODA RADICULAR	5	2	0	7
BLOQUEO Y TRASLADO	0	4	0	4
TOTAL	959	372	534	1.865

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Muta	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 21 de 98	

Del listado total de árboles que serán objeto de tala y cuya labor es de competencia del Jardín Botánico, se seleccionaron los individuos pertenecientes a las tres especies de interés, que contaron con asignación de código en el Sistema de Gestión del Arbolado Urbano SIGAU y que se localizaban en las tipologías de emplazamiento Parques de Barrio, Parques Metropolitanos y Parques Zonales.

Se generó un cronograma de visitas y se procedió a levantar la información relacionada con las nuevas variables, para finalmente volver a verificar su nivel de riesgo bajo los parámetros establecidos en el modelo de la SDA, y se corrió el modelo establecido. A partir de los resultados obtenidos se efectuó una propuesta de ajuste al modelo formulado por la SDA.

8.2. Análisis de la información

- Se realizaron análisis de frecuencia de falla para todos los árboles reportados con eventos de falla en la ciudad de Bogotá dentro de los periodos 2011 – 2022
- Se realizaron análisis de frecuencia relativa de falla de los árboles con respecto a la totalidad de individuos presentes en la ciudad y con respecto a su localización a nivel administrativo (análisis por localidades)
- Se establecieron nuevas variables y su parametrización para la evaluación visual externa de los individuos que fueron considerados en riesgo por la Secretaría de Ambiente.

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Muta	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 22 de 98	

- Una vez sistematizadas las variables visuales externas, se realizó una evaluación subjetiva del nivel de riesgo, asignando una calificación de 1 a 4, siendo 4 el nivel más alto.
- Para la caracterización interna de la madera se utilizó un tomógrafo sónico PiCUS 3 en la base del árbol a 30 cm aproximadamente del suelo, de donde se obtuvo un tomograma en formato de imagen, y se extrajeron las tablas de velocidades de onda para los 32 individuos. El análisis digital de imagen se realizó con el software *Image J*, permitiendo así, la diferenciación precisa de las coloraciones generadas por los cambios de velocidad encontrados en el tomograma, representando de esta forma la condición de la madera en la sección evaluada.
- Finalmente, se efectuó un análisis de correlación existente entre las 21 variables externas caracterizadas con respecto a la proporción de áreas afectadas en la sección del tallo, según los resultados de la tomografía. En este caso, el estado interno del árbol se tomó como variable dependiente, en tanto que las variables externas constituyeron como variables independientes y de esta forma efectuar un análisis basado en un modelo de riesgo que integre dichas variables. Para validar el modelo, se realizó un análisis de regresión a través del Programa R.

9. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Mutis	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 23 de 98	

No.	ACTIVIDAD	PROGRESO %									
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
1	Revisión bibliográfica sobre los factores de amenaza que inciden sobre el volcamiento o falla del arbolado urbano. Creación de base de datos de literatura científica con reporte de autores, título, objetivos, metodologías, conclusiones, url.										
2	Selección de factores y/o variables utilizadas actualmente para la evaluación del riesgo, y su relación con los instrumentos y variables actualmente utilizadas para la valoración de la amenaza										
3	Determinación y definición de factores y/o variables que puedan incorporarse al proceso de evaluación de la amenaza de falla de árboles urbanos										
4	Parametrización y estandarización de los factores y/o variables definidas para la evaluación de la amenaza de falla de los árboles y definición del instrumento de levantamiento de información.										
5	Consulta del arbolado urbano en el sistema de gestión SIGAU que ha sido determinado en condición de alto riesgo por parte de la SDA, para la selección de individuos objeto de la aplicación del instrumento de evaluación de amenaza.										
6	Presentar informe del estado y distribución de 50 árboles seleccionados según bases de datos SIGAU y otras bases disponibles										
7	Realizar la visita técnica de los árboles seleccionados para efectuar su evaluación según los nuevos instrumentos y parámetros establecidos.										
8	Sistematización la información colectada en campo.										
9	Elaborar informe final con el análisis de amenaza efectuado a los árboles seleccionados, partir de la aplicación del nuevo instrumento y variables establecidas .										
10	Entrega Informe de investigación										

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Muta	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				 
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 24 de 98	

10. RESULTADOS

10.1. Análisis retrospectivo de falla de árboles en Bogotá, periodo 2011-2022

De acuerdo a lo reportado en las bases de datos suministradas por la Secretaría de Ambiente de Bogotá (SDA), se tiene que existen 4.564 eventos de falla del arbolado urbano en el periodo 2011-2022 (hasta el 25 de octubre de 2022). La validación de información a partir de la vinculación de los reportes con la información del SIGAU a través del código asignado a cada árbol y de la localización geográfica, determinó que 1.696 árboles que presentaron un evento de falla, no cuentan con código SIGAU o no fue posible su asignación a partir de su localización espacial reportada. Este valor representa el 39,6% de los datos registrado para el periodo, por lo que limita la capacidad de análisis de las diferentes variables que asociadas al árbol fallado.

A partir de la información reportada en las bases de datos, se tienen algunos elementos de interés para el análisis en el que, como elemento determinador, debía contar con registro de información para todo el periodo. La información específica asociada a los árboles tales como diámetro, altura y otros asociados a la copa, solo está registrada para la base 2011-2018, por lo que su análisis no se incluye en este informe.

A continuación, se presenta un análisis de las distintas variables reportadas para todo el periodo.

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Muta	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				 BOGOTÁ JARDÍN BOTÁNICO DE BOGOTÁ
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 25 de 98	

10.1.1. Distribución temporal de los eventos de falla en Bogotá D.C.

Se observa un creciente reporte de eventos de falla en árboles urbanos a través del periodo analizado. Esta situación puede deberse a varios factores que actúan de manera individual o combinada para la ocurrencia de un evento, estos factores podrían relacionarse con:

1. El aumento en la edad y tamaño de los árboles presentes en la ciudad
2. El mejoramiento en los instrumentos y medios de reporte de eventos de falla y la consecuente atención por parte de los entes competentes
3. El efecto que puede tener la ejecución de obras de infraestructura de la ciudad sobre el arbolado, particularmente asociados a los efectos que éstas podrían generar sobre la estabilidad, estado sanitario de los árboles y acceso a recursos como agua y nutrientes.
4. La interacción de las condiciones meteorológicas con las condiciones particulares de los individuos, bajo escenarios de variabilidad climática
5. La aparición de nuevas plagas o enfermedades en el arbolado urbano.

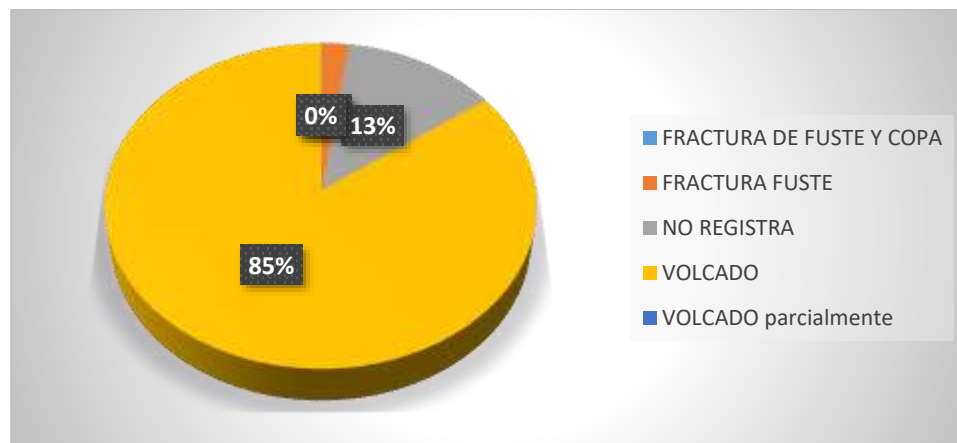
10.1.2. Tipo de Falla

Se distinguen 4 tipologías de falla de árboles, cuyo caso más frecuente está representados por el denominado volcamiento (85%), en tanto que la fractura de fuste y fractura de copa escasamente alcanzan el 2,25% (Figura 3). Se denota una proporción no despreciable del 13% sin registro, la cual debería distinguirse dentro

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Muta	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 26 de 98	

de las diferentes categorías. Para el caso de las fracturas, se distinguen al menos dos tipos (i. fuste y copa y ii. fuste), y para el caso de árboles volcados, se reporta una categoría alternativa que corresponde a volcado parcialmente. Frente a la distinción entre cada categoría de falla, no existe una definición que determine con claridad las diferencia entre una y otra.

Figura 3 Tipología de falla reportada para los eventos durante el periodo 2011-2022



Fuente: SDA, 2022, Adaptado JBB, 2022

10.1.3. Eventos por tipología de especies

144 especies vegetales que hacen parte de la infraestructura verde de la ciudad (388 en total según SIGAU) han presentado algún evento de falla, sea este volcamiento, desrame o fractura. Los hábitos o portes de las especies reportadas, involucran principalmente a

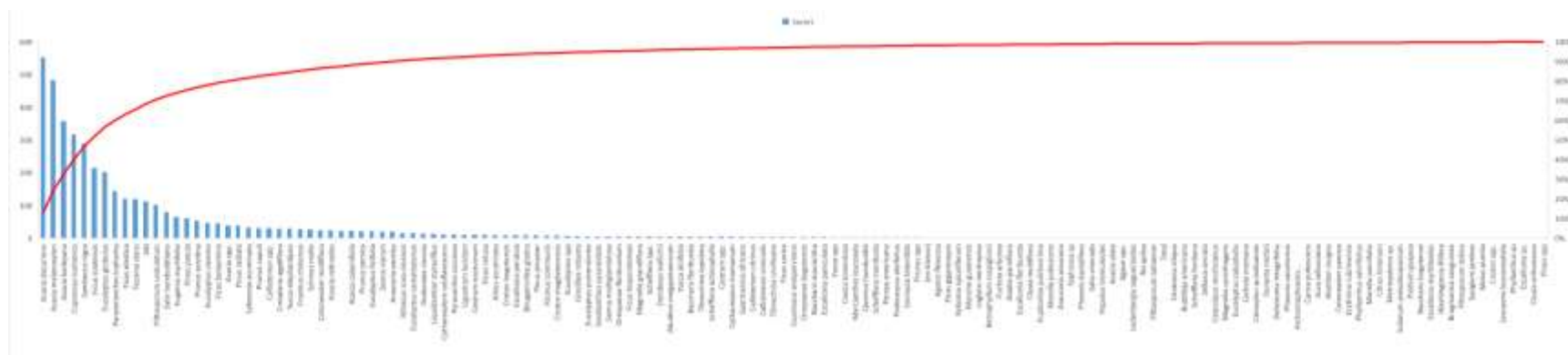
	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 27 de 98	

árboles, pero también incluyen especies de hábito arbustivo, palmas y algunas arrocetadas, en cuyo caso, su inflorescencia alcanza grandes dimensiones capaces de generar peligro al momento de presentarse cualquier tipo de falla o colapso, como ocurre en el caso de la especie fique. El 80% de los eventos de falla se concentra en 18 especies plenamente identificadas, más una categoría que conforman individuos de especies indeterminadas (Figura 4).

De las 18 especies con mayor frecuencia de falla y que están plenamente identificadas, 14 son foráneas (2.604 casos – 79%) y 4 de origen nativo (707 casos – 21%). Las especies nativas con mayor frecuencia de falla corresponden a: *Sambucus nigra*, *Ficus soatensis*, *Tecoma stans* y *Salix humboldtiana*; de estas especies, se puede considerar que *F. soatensis* y *S. humboldtiana* son las que más capacidad de daño o impacto tendrían al momento de presentar un tipo de falla, debido a su porte, cobertura de copa y localización dentro del espacio público. Las 14 especies restantes clasificadas dentro de las de mayor frecuencia de falla, se caracterizan por alcanzar gran porte, por lo que la capacidad de afectación es mucho mayor; dentro de este grupo con gran potencial de impacto, se destacan: *A. melanoxylon*, *C. lusitanica* y *E. globulus*. Al realizar una comparación de la proporción de eventos de falla que relaciona la cantidad de eventos por especie, respecto a la cantidad de individuos existentes en Bogotá, se tiene que *Ficus elastica*, *Acacia baileyana* y *Eucalyptus cinerea*, representan las especies más vulnerables a presentar una falla (Figura 5).

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Mutis	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				 JARDÍN BOTÁNICO DE BOGOTÁ
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 28 de 98	

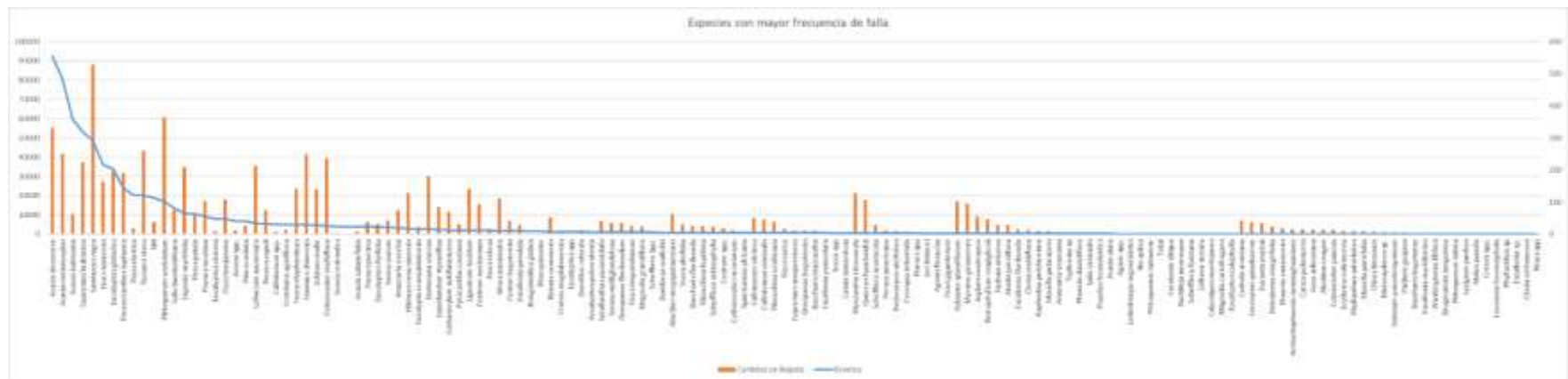
Figura 4 Distribución de especies con mayor frecuencia de evento de falla



Fuente: SDA, 2022, Adaptado JBB, 2022

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE <i>Jardín Botánico José Celestino Mutis</i>	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 29 de 98	

Figura 5 Comparación de especies más abundantes en Bogotá con respecto a la frecuencia de falla



Fuente: SDA, 2022, Adaptado JBB, 2022

	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 30 de 98	

10.1.4. Eventos por localidad

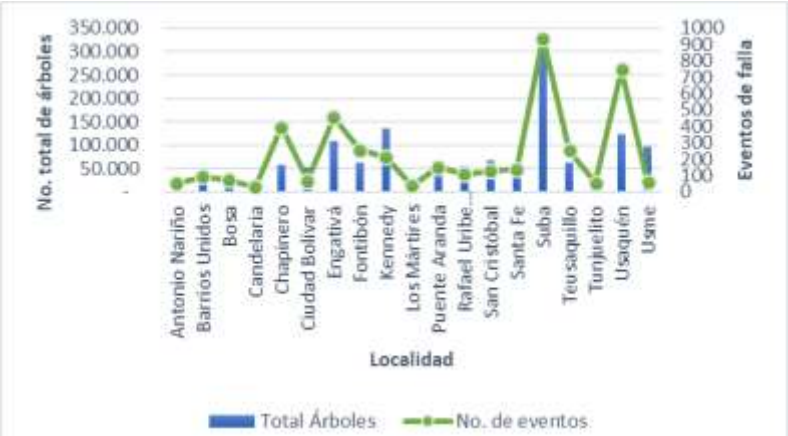
De acuerdo a la distribución de árboles fallados por localidad, se distinguen tres grupos: el primer grupo contiene a las localidades cuya frecuencia relativa está asociada a la gran cantidad de árboles existentes en la localidad como ocurre en 11 de ellas, en este caso, la localidad de Suba es representativa de esta situación; el segundo grupo lo conforman 3 localidades donde la proporción de frecuencia de volcamiento es menor a la cantidad de árboles existentes tal como ocurre en Ciudad Bolívar, Kennedy y Usme; y un tercer grupo, donde la frecuencia relativa de volcamiento es proporcionalmente más alta a la cantidad de árboles existentes, este último caso. Es factible que esta situación obedezca a una cultura de reporte de eventos más activa por parte de la comunidad que en otras localidades donde la situación es probablemente resuelta directamente, en vez de acudir a otras instancias (Figura 6).

10.1.5. Eventos por tipo de emplazamiento

De las 36 tipologías de emplazamiento establecidas en el SIGAU, en 30 se han registrado eventos de falla del arbolado urbano. En varios casos, no se ha registrado con exactitud el tipo de emplazamiento, alcanzando un reporte proporcionalmente importante dentro de los eventos (30%), por lo cual es necesario hacer la precisión al momento de la clasificación de manera que contribuya adecuadamente a los análisis que involucren el tipo de emplazamiento como factor de análisis en los procesos de falla (Figura 7).

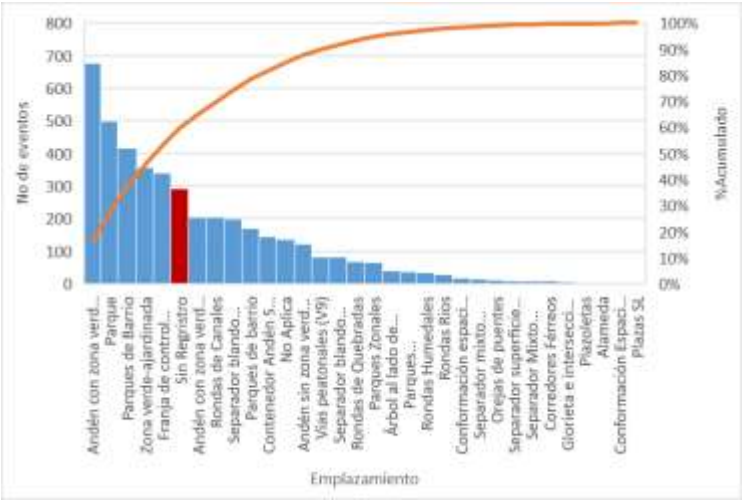
	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 31 de 98	

Figura 6 Distribución de los eventos de falla y cantidad de árboles existentes por localidad



Fuente: SDA, 2022, Adaptado JBB, 2022

Figura 7 Distribución de eventos de falla por tipología de emplazamiento



Fuente: SDA, 2022, Adaptado JBB, 2022

	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 32 de 98	

En 10 tipologías de emplazamiento se concentra el 80% de los casos, incluyendo las fallas en las que no tienen registro de la tipología de emplazamiento o cuya denominación no concuerda con una de las señaladas por el SIGAU. De las 10 tipologías donde se presentaron eventos de falla, solo dos (azva y aszv), no tendrían disponibilidad suficiente para el desarrollo de raíces o serían las más vulnerables a daños en el sistema de soporte de los árboles por confinamiento y/o corte de raíces por el desarrollo y mantenimiento de obras de infraestructura gris urbana, de forma contraria en áreas verdes con amplias superficies para el desarrollo radicular también exhiben eventos de falla. Ante este contraste, el tipo de emplazamiento no estaría directamente relacionado con la falla, si no con otro tipo de factores.

10.1.6. Eventos por tipología de espacio

Hace referencia al espacio público o privado, como condición determinante en la ejecución de competencias de manejo del arbolado urbano, no obstante, esta tipología es independiente a los factores que influyen directamente la generación de un evento de falla en el arbolado urbano. El análisis representa la necesidad de incorporar elementos de análisis del entorno del arbolado urbano, que en estos casos no cuenta con información de detalle que pudiera ser útil en los análisis, pero que a la postre podrían contribuir con información para un análisis más completo dentro de la gestión del riesgo.

De acuerdo con la información disponible, El 68% de los eventos de falla de árboles están claramente identificados como pertenecientes al espacio público, en tanto que un 20% no

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Muta	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 33 de 98	

registra este tipo de información y solo un 12% está asignado al espacio privado. Se registran casos de 6 o menos casos para áreas no pertenecientes a la jurisdicción y también se reportan casos en los que no es clara la distinción entre espacio público o privado (Figura-8).

Figura-8 Distribución de los eventos de falla por tipo de espacio



Fuente: SDA, 2022, Adaptado JBB, 2022

10.2. Impacto generado por los eventos de falla

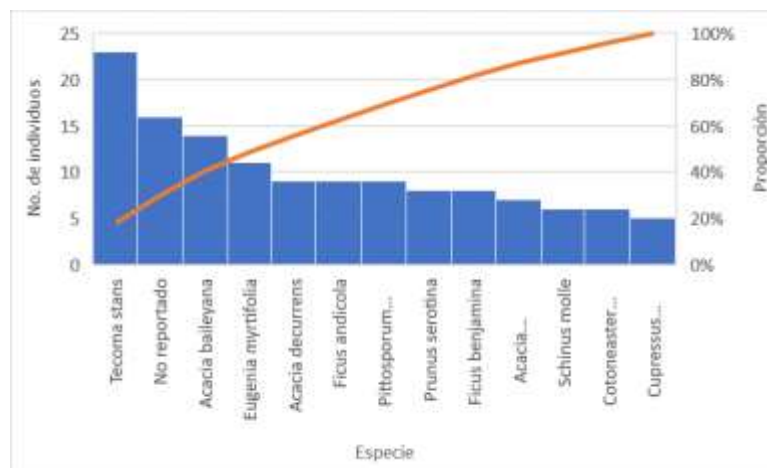
En un análisis específico para los árboles que han sido reportados a través de la línea de emergencias y compilada por el IDIGER desde el año 2011, se tiene que el top cinco de las especies reportadas corresponden a las especies *C. lusitanica*, *A. decurrens*, *A. melanoxylon*, *Eucaliptus globulus*, y *A. baileyana*, todas ellas de origen foráneo, en tanto que dentro de las especies nativas con mayor reporte se encuentran *Salix humboldtiana*,

	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 34 de 98	

Ficus andicola y *Prunus serotina*. Manteniendo una constancia en la tipología de especie que presenta algún tipo de evento de falla.

Al hacer un seguimiento a las afectaciones causada, la base de datos compilada por el IDIGER, resulta insuficiente para el análisis. De los registros disponibles, solo se puede obtener información relacionada con golpe a vehículos, sin que necesariamente se establezca una relación con heridos asociados al evento, lo cual puede ser factible al momento de la ocurrencia de un evento (Figura 9).

Figura 9 Especies involucradas en eventos de daño a vehículo por falla del árbol



Fuente: IDIGER, 2022, adaptado JBB, 2022

De acuerdo a los registros, las especies involucradas en este tipo de afectación, son de porte mediano a bajo y coincide en términos generales con la frecuencia absoluta de árboles

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Mutis	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				 BOGOTÁ JARDÍN BOTÁNICO DE BOGOTÁ
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 35 de 98	

en la ciudad, sin embargo, las especies que son capaces de generar una mayor afectación dado el tamaño que alcanzan (altura y diámetro), solo aparecen en los últimos lugares, tal como ocurre con el caso de *C. lusitanica*.

10.3. Selección de especies para el análisis

El top 10 de las especies con mayor frecuencia de volcamiento, siete (7) especies son de origen foráneo, en tanto que las especies nativas solo están representadas por tres (3) especies (

Figura-10). De estas especies, las que tienen una mayor capacidad de daño al presentarse un evento de falla corresponden a *Acacia melanoxylon*, *Cupressus lusitanica* y *Eucaliptus globulus*, teniendo en cuenta que en el entorno urbano pueden sobrepasar los 25 metros de altura. Las restantes especies son de porte menor, pasando de árboles medianos a arboles pequeños o arbolitos cuya capacidad de daño, puede ser significativamente bajo, dependiendo de las condiciones de emplazamiento e interacciones sociales que se dan en su entorno.

10.3.1. Caracterización de los individuos que generaron eventos de falla

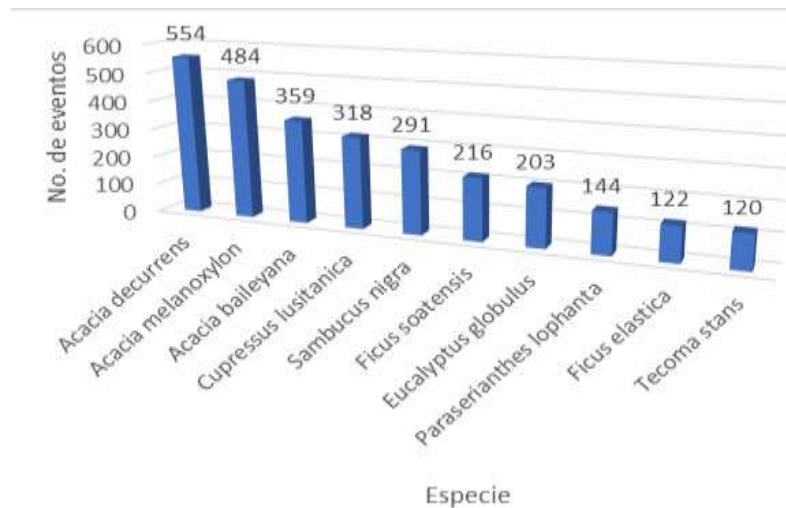
La caracterización del tamaño de los individuos que generaron algún tipo de falla, se basó en información 2011 – 2019, dada la completitud de la información. Para los individuos reportados como un evento de volcamiento las dos variables de tamaño más importante,

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Muta	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 36 de 98	

tales como el diámetro y la altura total, exhiben la forma de una jota invertida, es decir que la mayoría de los eventos se presentaron en tamaños de diámetro y alturas menores y van disminuyendo gradualmente a medida que los árboles son más grandes. En todas las categorías establecidas (cada tres metros), hubo reporte de árboles volcados.

Al considerar la variable altura, teniendo en cuenta el alcance que tiene un evento de volcamiento y las implicaciones a nivel de riesgo, el 90% de los eventos lo conforman árboles menores a los 12 m de altura (Figura -11).

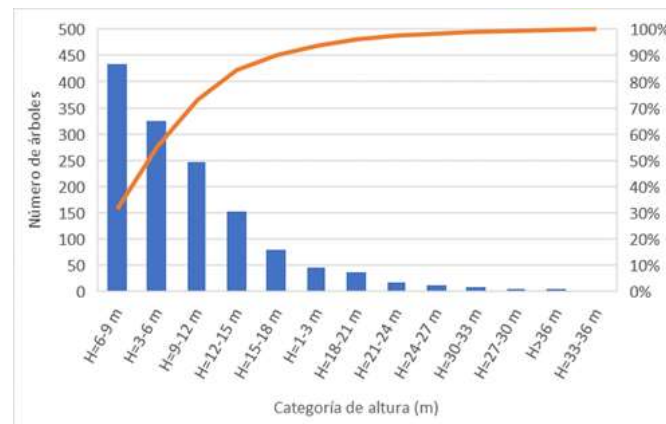
Figura-10 Especies con mayor frecuencia de volcamiento en Bogotá 2011-2022



Fuente: SDA, 2022, adaptado JBB, 2022

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Mutis	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				 BOGOTÁ JARDÍN BOTÁNICO DE BOGOTÁ
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 37 de 98	

Figura -11 Reporte de altura de árboles volcados 2011-2018

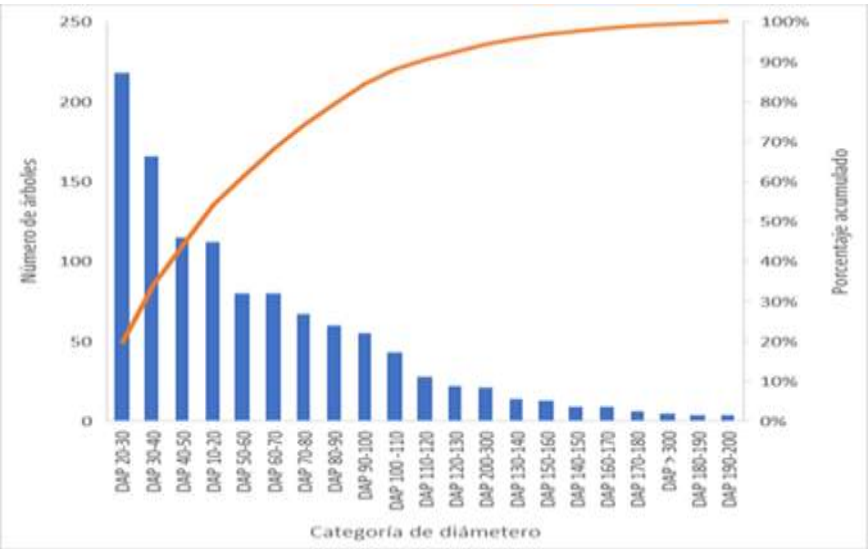


Fuente: SDA, 2022, adaptado JBB, 2022

La distribución diamétrica de los árboles también sigue el mismo patrón observado con la variable altura. en este sentido, la información establece que los eventos más comunes se concentran en las clases de tamaño menores y van disminuyendo a medida que el diámetro aumenta, sin que exista ninguna categoría de diámetro que no presente un evento de volcamiento. De acuerdo a los resultados se tiene que los eventos se concentran en árboles cuyo fuste no alcanzaba los 60 cm, teniendo una proporción de eventos cercana al 50% para árboles que no habían alcanzado los 50 cm de diámetro (Figura 12).

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Muta	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 38 de 98	

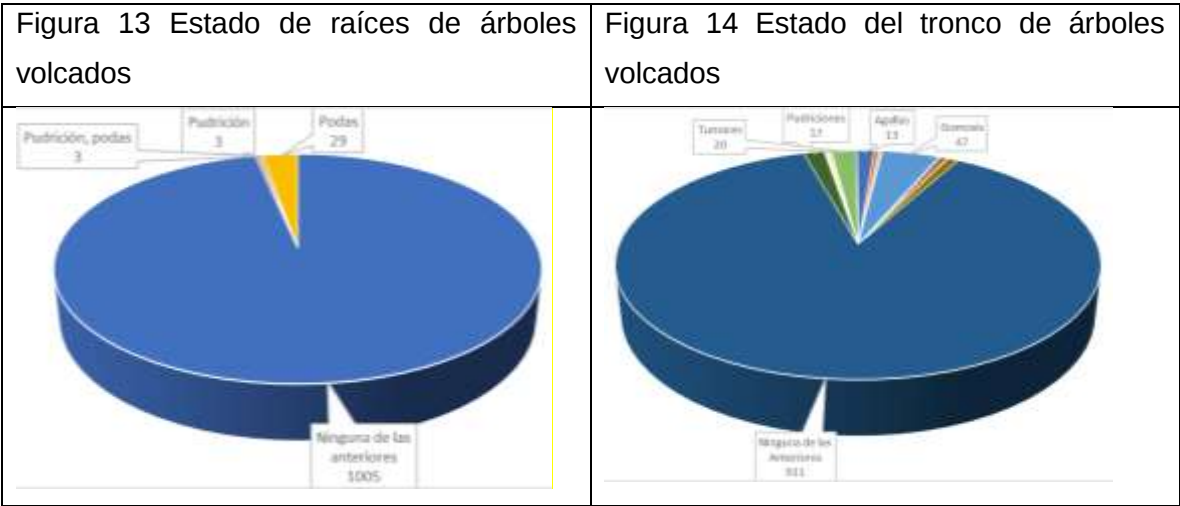
Figura 12 Distribución diamétrica de los árboles reportados con un evento de volcamiento



Fuente: SDA, 2022, Adaptado JBB, 2022

Siguiendo las opciones de registro de información asociada al estado de las raíces y del tronco conforme se presenta en la plataforma SIGAU, se tiene que el mayor registro señala la opción de “ninguna de las anteriores”, haciendo referencia a que no se identifica ni pudriciones, ni podas a nivel de raíces o tumores, pudriciones y/o agallas a nivel del tronco (Figura 13 y Figura 14).

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Muta	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 39 de 98	



De acuerdo a estos reportes, los árboles que presentan algún tipo de afectación tanto en el componente subterráneo (raíces) como en el aéreo (follaje y fuste), determinaría que los eventos de volcamiento se presentaron principalmente en árboles sanos. Sin embargo, al revisar otra información asociada en el campo “observaciones”, si existen reportes que advierten sobre peligro de caída, u otras situaciones sanitarias o físicas de los árboles que podrían contribuir a la presentación de un evento de tales características. En este caso, las condiciones que determinan el volcamiento estarían relacionadas con las condiciones biomecánicas de los individuos o se requiere de una deducción más estricta de los motivos que generaron la ocurrencia de un evento.

Adicionalmente, la presencia de una gran proporción de información que no señala ningún tipo de afectación a fustes y copas desde su condición sanitaria, estaría determinando que los árboles no presentaban una situación detonante o facilitador del evento de manera

	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 40 de 98	

intrínseca (por el propio árbol), si no que estaría involucrando variables externas diferentes a las reportadas por el actual modelo del SIGAU.

1367 árboles de los 1961 eventos reportados como árboles volcados entre el periodo de estudio, señalan que para la variable ángulo de inclinación “0°”. De acuerdo con este reporte, se estaría ratificando que los árboles caídos no tenían una condición de riesgo específica o particularmente asociada a la inclinación.

10.4. Concepto de falla en el arbolado urbano

No existe un concepto que establezca con precisión la definición de falla en un árbol en el contexto nacional. La literatura académica desarrolla los elementos que definen una falla en los individuos arbóreos, su evaluación o su capacidad de impacto; en algunas publicaciones se señala algunas condiciones para su manejo, pero no desarrolla el concepto. En este sentido, se propone como definición de falla como aquella condición generadora del colapso de un individuo arbóreo completo o parte de éste, con compromiso de sus componentes estructurales (raíz, tallo, ramas o su combinación), afectando su funcionalidad y condición paisajística. La falla de un árbol es la materialización de un evento de riesgo.

10.4.1. Tipos de Falla

Actualmente los tipos de falla no se encuentran estrictamente tipificados y definidos, sino que resulta de la interpretación directa de los términos usados comúnmente ante la

Página 40 de 98

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Muta	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 41 de 98	

materialización de un evento. Los tipos de falla que se pueden presentar en los árboles se clasifican en tres tipos:

10.4.1.1. Volcamiento

Corresponde a la caída total del individuo (fuste y copa), involucrando en la mayoría de los casos su desarraigo total o parcial, por el levantamiento de la palca de raíz. Las razones que potencian la ocurrencia de este tipo de fallas, pueden deberse a la diferencia de fuerzas acción y reacción que ocurren en el individuo y que están asociadas a las condiciones propias del árbol (tales como densidad y biomasa, tamaño, etc.), como las condiciones externas del sitio (viento, precipitación, etc.). Según Sinn y Wessolly (1989) y Niklas (1992), la aplicación de estas fuerzas genera un aumento en las tensiones sobre las raíces, ya que las fuerzas que ocurren en la corona del árbol se transfieren al sistema radicular a través de las partes del árbol sobre el suelo, siendo así el anclaje y estado de la raíz una característica importante para potenciar la ocurrencia de éste tipo de falla (Peltola, 2006 citado por Mendoza 2018). En algunas ocasiones, el volcamiento no involucra el levantamiento de la placa radicular, sino que el colapso del árbol se sitúa en el cuello del fuste, como consecuencia de la pérdida de resistencia del mismo originada por su condición interna.

10.4.1.2. Fractura del tronco

Este tipo de falla hace referencia a la rotura del tronco, sin compromiso de la raíz, ni el cuello del fuste y puede involucrar total o parcialmente la copa del individuo. Está relacionado principalmente con la estructura aérea del mismo, teniendo en cuenta así las

	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 42 de 98	

características de la madera en el momento de la fragmentación tales como módulo de elasticidad, el módulo de cizalladura, la resistencia integral, la resistencia a la tracción, la resistencia al cizallamiento y la resistencia a la torsión (Sinn y Wessolly, 1989).

10.4.1.3. Caída de ramas

Este tipo de falla involucra solo una porción de las estructuras aéreas del árbol que conforman la copa; esto corresponde específicamente a las ramas leñosas (indistintamente de su nivel) y no involucra estrictamente la muerte del árbol, pero si puede comprometer su calidad estética, facilitar el ataque de patógenos o potenciar nuevos eventos de falla. Se refiere específicamente al desprendimiento o desgarro de la ramificación producto de la aplicación de algún tipo de fuerza principalmente relacionada con la gravedad y algún tipo de defecto mecánico en el área donde se da el desprendimiento. El impacto de este tipo de fallas está relacionado directamente con el tamaño de la rama. En este tipo de falla, es necesario distinguir que existen fenómenos de poda natural aplicables a algunas especies.

10.4.2. Anomalías asociadas a la probable generación de una falla

Si bien, la ocurrencia de fallas puede ser un proceso azaroso, existe una serie de anomalías o indicadores que determinar una mayor probabilidad de ocurrencia de fallas. De acuerdo con Haaften, et al., 2021 existe una serie de anomalías generadores de falla potencial, las cuales son relacionadas en la Tabla 2.

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE <i>Jardín Botánico José Celestino Muta</i>	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 43 de 98	

Tabla 2 Anomalía y fallas potenciales en el arbolado

Anomalía	Falla Potencial
Rama desproporcionada	Caída o desplome por descompensación de esfuerzos
Rama seca	Caída o desplome por pérdida de vitalidad
Rama con cavidad en la inserción	Caída o desplome por pérdida de resistencia
Rama con inserción débil	Caída o desplome por pérdida de resistencia
Defoliación total	Caída total o parcial del árbol por pérdida de vitalidad
Tronco retorso	Volcamiento por descompensación de esfuerzos
Tronco inclinado	Volcamiento por desvío del centro de gravedad
Tronco torcido	Volcamiento por desvío del centro de gravedad
Tronco ahuecado	Volcamiento por pérdida de resistencia
Tronco fracturado	Desplome parcial por descompensación de esfuerzos
Tronco con bifurcaciones atípicas	Desplome de bifurcaciones por desbalance de masas
Raíces constreñidas	Volcamiento por desbalance de masas
Raíces principales podadas	Volcamiento por pérdida parcial de arraigo
Raíces con crecimiento atrofiado/desviado	Volcamiento por arraigo irregular

Fuente: Haaften, et al., 2021, adaptado JBB, 2022

Estas anomalías deber ser detectadas en cualquier proceso de diagnóstico para posibilitar una adecuada gestión del riesgo, en el que se logró de alguna forma, estimar la amenaza

Página 43 de 98

	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 44 de 98	

o peligro de que una falla ocurra y genere un evento catastrófico. Si bien, existe una importante información de cada uno de los árboles de Bogotá gestionada a partir del SIGAU, la integración en un modelo que permita analizar sistemáticamente la condición de un árbol y establecer un nivel de riesgo, aún no ha sido plenamente establecido y usado para la planeación del manejo del arbolado urbano. El análisis conjunto de distintas variables bajo una apropiada parametrización y el hallazgo de interacciones significativa entre estas puede contribuir a mejorar el diagnóstico de los árboles conducentes a una verdadera gestión del riesgo. La generación de nuevas variables, su conceptualización y su adecuado registro, analizados bajo diferentes modelos puede contribuir a la optimización de los mecanismos de valoración del riesgo.

10.5. Nuevas variables para la evaluación del riesgo del arbolado urbano

La selección de las variables se realizó teniendo en cuenta únicamente las variables que se consideran de influencia para la evaluación del riesgo de caída de los árboles de acuerdo a la literatura académica publicada y la información silvicultural registrada para los árboles de la ciudad.

Teniendo en cuenta que muchas de estas variables no se encuentran definidas, y que esto dificulta su correcta identificación en el árbol, se estableció una definición particular y se parametriza la forma en la que la variable puede ser medida en el individuo, con el objetivo de generar una matriz de ponderación cada una de las variables, y de este modo obtener una calificación que permita su asociación con un nivel de riesgo aproximado.

	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 45 de 98	

Las variables se categorizaron en dos grupos: i) variables endógenas, las cuales hacen referencia a las características propias del árbol, dividiendo el árbol en las partes que conforman su estructura básica: copa, fuste o tronco y raíces, según metodología propuesta por Durand (2017), y ii) variables exógenas que hacen referencia a las características del entorno en el que se encuentra el árbol y que involucran aspectos de su emplazamiento, tipología de suelos y factores climáticos influyentes de manera específica (Tabla 3).

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Mutis	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				 BOGOTÁ JARDÍN BOTÁNICO DE BOGOTÁ
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 46 de 98	

Tabla 3. Variables utilizadas para la evaluación del riesgo de falla en árboles urbanos.

COMPARACIÓN VARIABLES SEGÚN MODELOS CONSULTADOS										
VAR	TIPO	COMPONENTE	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	SDA	IS/Revera, 2015	Durand, 2017	Defensa Civil Mauk	Beir Tree Risk, SA	
VARIABLES	ASOCIADAS AL ÁRBOL	GENERAL	Especie (SP)	Especie	x	x		x	x	
			Diámetro a la altura del pecho (DAP)	m	x	x		x	x	
			Altura (H)	m	x	x	x	x	x	
			Ángulo de inclinación del fuste (AI)	° a partir de la vertical	x	x	x	x	x	
			Edad (E)	años						
			Forma/arquitectura/fenotipo				x			
			Vigor						x	
			Parte a fallar				x		x	
			Tamaño de la parte a fallar	dimensión de la parte			x		x	
			Altura de copa (HC)	m	x				x	
		COPA	Diámetro de copa (DC)	m	x				x	
			Densidad de copa				x		x	
			Forma de la copa					x		
			Balance de copa						x	
			Ramas (Codominancia)				x	x		
			Grieta en ramas					x	x	
			Ramas peligrosas				x	x		
			Foliaje	%			x	x	x	
			Plagas					x	x	
			Historial de podas				x	x	x	
		RAÍZ Y CUELLO DE RAÍZ	Hongos en raíces				x		x	
			Uniones débiles				x		x	
			Raíces #				x	x		
			Cuello						x	
			Anillado						x	
			Muerta						x	
			Decaimiento						x	
			Hongos						x	
			Raíces						x	
			Grietas						x	
		FUSTE	Raíces cortadas						x	
			Hueso				x		x	
			Levantamiento de placas						x	
			Situaciones					x	x	
			Oscuridad/ventilación						x	
			Ataque de insectos						x	
			Historial de podas						x	
			Grietas				x	x	x	
			Chancro	%			x		x	
			Afectación sanitaria (%)			x		x	x	
		ASOCIADAS AL ENTORNO	Putrefacción	%			x		x	
			Hongos					x	x	
			Medida muestra	%			x		x	
			Emplazamiento (EM)	Tipo	x	x				
			Suelo					x	x	
			Topografía	%					x	
			Sitio						x	
			Conflicto con infraestructura				x	x	x	
			Clima						x	
			Precipitación del día del volcamiento (R)	mm	x					
		CLIMÁTICAS	Humedad del suelo					x		
			Viento	Km/h	x				x	
			Cercanía al objetivo				x		x	
			Tránsito				x			
SDA										
Secretaría de Ambiente de Bogotá, Grupo de Investigación y Sistemas de Información Geográfica, 2020. Modelo de riesgo de volcamiento de árboles en Bogotá (Velandia et al, 2020)										
JBB										
Jardín Botánico de Bogotá, 2015										
Surat										
Tesis. Universidad Nacional Agraria La Molina. Propuesta de criterios para la determinación de niveles de riesgo generado por árboles en el distrito de San José. Lima - Perú										
Defensa Civil Mauk: Formato obtenido del II Foro del Riesgo en Brasil										

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Muta	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				 BOGOTÁ JARDÍN BOTÁNICO DE BOGOTÁ
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 47 de 98	

10.6. Definición, selección y parametrización de variables para la evaluación del riesgo.

La definición de variables partió de la comparación de diferentes aplicaciones efectuadas en distintas áreas del mundo, en donde se evaluó el riesgo de falla de árboles en contextos urbanos (Tabla 2). A partir de este ejercicio, se pudo seleccionar las variables más comúnmente utilizadas en estos procesos.

10.6.1. Variables endógenas:

- **Especie:** nombre común y científico del individuo
- **Diámetro a la altura de pecho:** es la medida del diámetro de la sección del fuste de un árbol hecha a una altura de 1,30 m desde el suelo (Juárez, 2014)
- **Altura total de árbol en metros:** se define como la distancia de la cima del árbol en pie y la base del árbol la cual está en contacto con el suelo. Se entiende la cima o ápice del árbol como la parte más alta del mismo que sea prolongación del eje del tronco (Juárez, 2014).
- **Altura del fuste en metros:** Es la dimensión en altura que se considera el fuste libre hasta la formación de la copa.
- **Altura primera rama:** dimensión en metros de altura desde la base hasta la primera rama o bifurcación del árbol. Si la bifurcación se genera antes de 1.30 metros de altura, cada fuste debe ser evaluado como un árbol individual.

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Mutis	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 48 de 98	

- **Dimensión de la copa en metros:** medida en metros desde el centro del fuste hacia la periferia del árbol donde se proyecta la sombra de copa, tomando como referencia el plano cartesiano. La medición de la proyección de copa se efectúa cada 45° ordenadamente, siguiendo las manecillas del reloj.
- **Perímetro en la base del árbol en metros:** longitud en metros de la circunferencia que conforma la base del árbol tomada a 15 cm de la línea imaginaria donde se determina el inicio del tallo libre de raíces.
- **Ramas secas:** son las ramas que se encuentran desprovistas de follaje o exhiben drásticos procesos de deshidratación, pérdida de la corteza o muerte descendente. En estos casos, a pesar de encontrarse la rama conectada al eje central del árbol, no posee un flujo adecuado de nutrientes en cualquiera de los sentidos. No debe confundirse con la condición natural de defoliación, la cual corresponde a un proceso fisiológico del árbol y que caracteriza a algunas especies, en cuyo caso, la defoliación generalmente ocurre en toda la copa y no en parte de ella, manteniendo un estado de latencia hasta el rebrote de nuevo follaje.
- **Podas no cicatrizadas:** vestigios de ramas o bifurcaciones del tronco que fueron podadas y que no desarrollaron cicatriz o cobertura leñosa.
- **Copa asimétrica:** Condición de desvío exagerado del centro la copa con respecto a su eje central, siendo este, la base del fuste.
- **Tumores:** Los tumores son hinchamientos pronunciados anormales en una planta leñosas, se da en fustes y ramas (Bergdahl y Hill, 2016; Allen et al., 2010), estos se pueden dar por enfermedad de bacterias, inestabilidad genética, estrés ambiental y heridas de insectos (Eom y Chung, 1994; Allen et al., 2010).

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Mutis	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 49 de 98	

- **Marchitamiento:** pérdida de turgencia de los tejidos, dada principalmente por infecciones vasculares o lesiones de la raíz, generando reducción en la absorción de agua y dando al árbol un aspecto decaído. Se expresa básicamente en el follaje y ramas no leñosas.
- **Chancros:** es una enfermedad de la corteza o ramas del árbol que ocasionan lesiones necróticas y a veces purulentas. puede presentarse en tejido leñosos como en succulentos.
- **Pudrición localizada:** enfermedad causada por hongos generalmente xilófagos que genera en árbol un deterioro progresivo de las paredes celulares y pérdida de la resistencia de la madera debido a la penetración del micelio dentro de las estructuras celulares y puede interrumpir el flujo de savia en la albura.

10.6.2. Variables exógenas:

- **Tipo de emplazamiento:** Corresponde a la tipología de sitio donde se encuentra establecido el individuo. Las tipologías se enmarcan en las unidades establecidas por el Manual de Coberturas del Distrito Capital
- **Obras civiles interferentes:** hace referencia a la evidencia de intervenciones en el entorno de la rizosfera del árbol o de su parte aérea provocado por la construcción de vías, andenes, materas, impermeabilizaciones, podas, etc. todas ellas ocurridas posterior al establecimiento del árbol.
- **Precipitación (mm):** Factor climático referencia a la cantidad lluvia caída por unidad de área

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Muta	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 50 de 98	

- **Velocidad del viento (m/s):** Factor climático referido al desplazamiento de ráfagas de viento en el tiempo.
- **Dirección del viento:** dirección del viento dominante conforme lo registros de la rosa de vientos o considerando los corredores formados por estructuras de la ciudad tales como edificios y otros árboles.
- **Dianas:** Se refiere a los elementos que conforman los bienes materiales y de servicios que se localizan en el área de influencia de un árbol, que pueden ser afectados por la ocurrencia de un evento de falla. Generalmente están asociados al uso por parte de personas, por lo que debe registrar la posibilidad de afectación a personas en caso de ocurrencia del evento.
- **Suelos:** refiere la condición del sustrato donde se enraiza y sostiene el árbol. Está determinado por el tipo, profundidad, contenido de humedad, presencia de escombros, entre otras variables.

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE <i>Jardín Botánico José Celestino Mutis</i>	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 51 de 98	

10.7. Análisis del riesgo para tres especies

10.7.1. Especies seleccionadas para el análisis del riesgo

De acuerdo a los análisis previos, se seleccionaron las tres especies del arbolado urbano con mayor capacidad de generar un impacto negativo al momento de presentar un evento de falla. En tal sentido, y siguiendo los resultados de frecuencia absoluta y relativa de los árboles volcados en la ciudad desde el 2011 al 2022 y el tamaño alcanzado por sus individuos en estado adulto, se seleccionaron las especies *Acacia melanoxylon*, *Cupressus lusitánica* y *Eucaliptus globulus*, todas ellas caracterizadas por sus altas dimensiones alcanzadas en el espacio urbano y localizarse en el top 10 de las especies con mayor frecuencia de falla.

Adicionalmente, se buscó que todos los individuos evaluados contaran con autorización para manejo silvicultural de tala, por estar generando algún nivel de amenaza y gracias a esta oportunidad de manejo, verificar condiciones del árbol, no asequibles en estado vivo, tales como el estado de la madera del tronco, el estado radicular, distribución de raíces, etc. (Tabla 4). Los 32 individuos evaluados se presentan en la Tabla 5 y su distribución en nueve (9) localidades de la ciudad, se presenta en la Figura 15.

Tabla 4. Listado de especies evaluadas

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Mutis	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 52 de 98	

No.	Árbol	Especie	Código-SIGAU	Localidad	Fecha evaluación
1	1	<i>Eucalyptus globulus</i>	10011005001371	ENGATIVÁ	15/09/2022
2	1	<i>Eucalyptus globulus</i>	9013303000134	FONTIBON	16/09/2022
3	1	<i>Cupressus lusitanica</i>	801110000068	KENNEDY	8/09/2022
4	1	<i>Eucalyptus globulus</i>	11012405000407	SUBA	13/10/2022
5	2	<i>Eucalyptus globulus</i>	11012405000375	SUBA	13/10/2022
6	1	<i>Acacia melanoxylon</i>	11012003000167	SUBA	14/10/2022
7	2	<i>Acacia melanoxylon</i>	11012003000125	SUBA	14/10/2022
8	4	<i>Cupressus lusitanica</i>	8011005001080	KENNEDY	9/09/2022
9	2	<i>Acacia melanoxylon</i>	10011303000931	ENGATIVÁ	15/09/2022
10	1	<i>Acacia melanoxylon</i>	9013001000319	FONTIBON	16/09/2022
11	1	<i>Acacia melanoxylon</i>	9013001000320	FONTIBON	16/09/2022
12	1	<i>Acacia melanoxylon</i>	13011802000301	TEUSAQUILLO	26/08/2022
13	1	<i>Acacia melanoxylon</i>	13011802000001	TEUSAQUILLO	1/09/2022
14	3	<i>Acacia melanoxylon</i>	13011804000840	TEUSAQUILLO	1/09/2022
15	4	<i>Acacia melanoxylon</i>	13011902000305	TEUSAQUILLO	2/09/2022
16	5	<i>Acacia melanoxylon</i>	13011902000303	TEUSAQUILLO	2/09/2022
17	1	<i>Cupressus lusitanica</i>	13021004000368	TEUSAQUILLO	6/10/2022
18	1	<i>Acacia melanoxylon</i>	1021104000119	USAQUEN	30/09/2022
19	1	<i>Eucalyptus globulus</i>	1011705000044	USAQUEN	30/09/2022
20	8	<i>Cupressus lusitanica</i>	15010207000124	ANTONIO NARIÑO	22/09/2022
21	9	<i>Cupressus lusitanica</i>	15010207000125	ANTONIO NARIÑO	22/09/2022
22	5	<i>Acacia melanoxylon</i>	15010301000365	ANTONIO NARIÑO	23/09/2022
23	4	<i>Cupressus lusitanica</i>	15010202000789	ANTONIO NARIÑO	23/09/2022
24	1	<i>Eucalyptus globulus</i>	08012206000995	KENNEDY	9/09/2022
25	2	<i>Eucalyptus globulus</i>	08012206000998	KENNEDY	9/09/2022
26	1	<i>Eucalyptus globulus</i>	08010803001145	KENNEDY	8/09/2022
27	1	<i>Acacia melanoxylon</i>	02021001000687	CHAPINERO	29/09/2022

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE <i>Jardín Botánico José Celestino Muta</i>	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 53 de 98	

No.	Árbol	Especie	Código-SIGAU	Localidad	Fecha evaluación
28	2	<i>Acacia melanoxylon</i>	02021001000688	CHAPINERO	29/09/2022
29	4	<i>Acacia melanoxylon</i>	02021001000402	CHAPINERO	30/09/2022
30	1	<i>Eucalyptus globulus</i>	19011303000214	CIUDAD BOLÍVAR	23/09/2022
31	1	<i>Acacia melanoxylon</i>	11012402004941	SUBA	7/10/2022
32	1	<i>Acacia melanoxylon</i>	1010202000161	USAQUEN	7/10/2022

Tabla 5. Cantidad de individuos evaluados a octubre de 2022

Especie	No. de individuos evaluados
<i>Acacia melanoxylon</i>	17
<i>Cupressus lusitanica</i>	6
<i>Eucalyptus globulus</i>	9
<i>Total</i>	32

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Mutis	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				 BOGOTÁ JARDÍN BOTÁNICO DE BOGOTÁ
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 54 de 98	

Figura 15. Distribución espacial de los árboles evaluados



 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Muta	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 55 de 98	

10.7.2. Definición de variables y parametrización

A partir de la revisión de literatura específica asociada a la evaluación del riesgo y los distintos parámetros considerados en modelos de valoración, se definieron 21 variables, de 83 propuestas inicialmente por la literatura. 19 de ellas clasificada como variables endógenas (asociadas al árbol) y dos, como variables exógenas, asociadas a factores climáticos (Figura 16).

Figura 16. Variables endógenas para la valoración visual externa de los individuos



 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE <i>Jardín Botánico José Celestino Muta</i>	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 56 de 98	

10.7.2.1. Variables relacionadas con la copa

- **Ramas secas:** Las ramas son la parte del árbol en donde reposan las hojas estas estructuras están unidas directamente con el árbol, ahora las ramas secas se encuentran desprovistas de vegetación y que a pesar de encontrarse conectadas al eje central del árbol no posee un flujo adecuado de nutrientes.
- **Densidad de la Copa:** Según Hale y Brown (2005), citados por Flores et al., 2014, la copa de los árboles es uno de los indicadores que permiten evaluar el estado de salud actual de los bosques, además de permitir la predicción de las condiciones futuras de los árboles y del ecosistema forestal. La densidad de la copa, hace referencia a aquella medición que estima la cantidad de ramas de la copa, follaje y estructuras reproductivas que bloquean la luz que atraviesa la copa, además, se debe tener en cuenta que cada especie tiene un tipo de copa normal que varía con el sitio genética y daños infringidos al árbol. La definición y levantamiento de esta variable se realizó a partir de la ficha del Programa Nacional de Inventario y Análisis Forestal de Estados Unidos (FIA, 2012) como se muestra en la Figura 17.

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Mutis	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 57 de 98	

Figura 17. Ficha de densidades de la copa. Fuente: FIA, 2012.



Fuente: FIA, 2012

- Síntomas Fisiológicos en la Copa
- **Marchitamiento:** Es un estado en que algunas partes de las plantas presentan flaccidez de los tejidos, se puede observar una pérdida de folíolos, reducción de crecimiento de la planta y un secamiento progresivo de esta, este síntoma puede estar relacionado a enfermedades, plagas o por que la planta no requiere de esta parte para sus funciones (Ramírez, J., et al. 2014). Además de esto la marchitez puede presentarse en cualquier etapa de la vida de un árbol (Salazar, I., et al. 2010).
- **Clorosis:** Se refiere a la falta de clorofila en un órgano vegetal, que se traduce en la pérdida de color verde de órganos que deberían presentar esta coloración. Esta condición es causada por la deficiencia de nutrientes esenciales para el desarrollo de la planta como

Página 57 de 98

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Muta	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 58 de 98	

(Fe, Mn, Mg, Zn, N, etc.), por la existencia de un estrés hídrico o el ataque de insectos, hongos, bacterias y virus (Sánchez, A. 2009). también se reconoce que este es el amarillamiento del tejido foliar causado por la falta de clorofila, esta inicia en las hojas más viejas ya que el nitrógeno (N) se traslada a tejidos más jóvenes que están en crecimiento; también puede darse por el drenaje insuficiente, raíces dañadas, raíces compactadas, alcalinidad alta y deficiencias nutricionales de la planta. (Shuster, J., s.f., Cervantes, J., 2017).

- **Decaimiento:** El decaimiento se asocia a la muerte progresiva de la copa de los árboles (Mueller, 1992; Montoya 1995; Cali, 1996); suele confundirse con la senescencia de un árbol, en la cual el árbol por envejecimiento empieza a morir naturalmente en cambio el decaimiento puede darse en cualquier momento de la vida de un árbol (Moore, W., 2002), esto debido a la desvitalización o desarreglos en el sistema biológico del árbol (Shigo, 1994)
- **Asimetría de la copa:** esta variable hace referencia a la llamada descompensación de copa, en la que la copa del árbol se desplaza hacia alguno de los lados, visto desde un lado, esta se presenta una mayor carga o acumulación de biomasa en unas zonas del árbol que en otras. Esta variable se midió a partir del radio de la copa en los ocho puntos cardinales (cada 45°) a partir del norte magnético.

10.7.2.2. Variables relacionadas al fuste

- **Tipo de Fuste:** El fuste se refiere al tronco de un árbol, siendo la estructura leñosa que va desde la parte basal del árbol o cuello de la raíz, hasta el ápice del mismo y puede tener varias ramificaciones, convirtiéndose así en un fuste monopódico o bifurcado (si tiene 2 o más ramificaciones por debajo de 1.30 m de altura (Fronteras, B. S. 2010).

Página 58 de 98

	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 59 de 98	

- **Perímetro en la base del árbol (m):** El perímetro o la circunferencia del fuste del árbol es una medida básica en cualquier individuo arbóreo, que sirve de base para mediciones de área basal, volumen, crecimiento, análisis estructurales, entre otras (Ugalde, 1981). Por otro lado, la base del árbol hace referencia a la zona baja del mismo, es decir, la parte del tronco que se encuentra cercana al suelo. Para la medición del perímetro en la base del árbol, no es necesario que se haga sobre el suelo, sino a una cierta distancia de este, lo sugerido es no pasar de 15 cm, aunque la irregularidad del terreno hace que esta varíe a lo largo de la circunferencia de la base del árbol.
- **Diámetro a la altura del pecho D.A.P. (cm):** El Diámetro a la altura del pecho (DAP) es la medida del diámetro que se debe tomar a la altura de 1.30 m del suelo (UNAM, 2018), esta medida indica el grosor del tronco a una altura normal y estandarizada en términos dasométricos, y puede correlacionarse con otros datos importantes asociados con la vida del individuo.
- **Altura total del fuste (m):** Hace referencia a aquella medida que es tomada desde la base del árbol o fuste, hasta la parte más alta de la copa y al igual que la altura hasta donde empieza la copa. Se puede medir con diferentes principios e instrumentos como los hipsómetros y trupulse. También se recomienda utilizar aplicaciones de teléfonos inteligentes (app) para esta medición.
- **Inclinación fuste (grados desde la vertical):** Esta medición hace referencia a los grados que se encuentra el árbol desviado de su eje vertical, y que no representa su condición natural de perpendicularidad frente a la horizontal. Este se mide a partir de diferentes instrumentos manuales o automáticos (inclinómetro).
- **Formas de la sección transversal del fuste:** La forma del fuste en la sección

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Muta	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 60 de 98	

transversal hace referencia al tipo de forma que presenta el fuste a una altura determinada. Esta medición se hace por medio de la observación de toda la circunferencia del tronco y el criterio de la persona, para esta se utiliza la imagen de referencia o a partir de la geometría arrojada por instrumentos como el calipter asociado al tomógrafo.

- **Grietas, fisuras o rajaduras:** Son aquellas fallas mecánicas en la madera, las cuales van en la dirección longitudinal del grano; cuando la grieta profundiza dentro de la madera y se extiende a lo largo de la madera, se llama rajadura. Estas grietas o rajaduras son producidas por los esfuerzos de crecimiento que se producen en los árboles (Trejos, Roque & Romero, 2004).
- **Cicatrices por poda:** Son una serie de marcas e irregularidades presentes en las áreas sometidas a podas, provocadas por mala cicatrización de los tejidos, en donde no se hizo un debido tratamiento, o como resultado de un mal curado. Cuando esta cicatriz empieza a pudrirse, crea cavidades en donde se alojan patógenos y se acumula humedad, condición que, a largo plazo, potencia la afectación al tallo principal del árbol.
- **Cavidades:** Son áreas deterioradas y profundas que comprometen tanto la corteza como la madera interna del árbol. Suelen hallarse en el fuste debido a que algunas especies de fauna las utilizan para anidación y refugio; Bonells (2021), menciona que las cavidades también pueden ser originadas por daños en la madera, generalmente hongos, ya que, si sucede una mala curación al romper y/o cortar una rama, esta herida se puede infectar y generar cavidades futuras. Sánchez, Artajo & Septién (2017), mencionan que las cavidades no son más que estados avanzados de degradación.
- **Fibra del fuste revirado (descripción):** hace referencia a la madera que, en vez de crecer de forma paralela a la médula o eje central, siguiendo la dirección del sistema vascular, crece en espiral a la médula, rodeando parcialmente el tronco. La corteza puede

	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 61 de 98	

generar fisuras por torsión o secciones donde se sobrepone o solapa, generando una especie de pliegues antinaturales. La madera de los árboles que presentan este defecto es quebradiza, poco densa y elástica.

- **Corteza incluida:** Durante el desarrollo de los árboles hay muchos factores que pueden dañar el tejido meristemático que permite el crecimiento del árbol; esta situación puede ser causada por pájaros, insectos, accidentes climáticos, podas entre otros; cuando esto ocurre el árbol intenta restaurar esta parte formando brotes, estos brotes son bifurcaciones accidentales los cuales compiten por luz y crecen en diferentes direcciones lo que hace que se expandan sus tejidos y estos se opriman entre sí, haciendo que se genere corteza incluida. La corteza incluida implica una intrusión de tejidos vivos y blandos dentro del tronco, que puede aparecer como una sola unidad, pero que puede estar fusionado o constituido por varias ramas. Por lo general en esta zona se generan estructuras débiles (Drenou, 2001; Martinez, T. & Islas L., 2010).

- **Afectaciones de origen biológico.**

- **Tumores:** Hace referencia a aquellas protuberancias irregulares y anormales en la madera, algunas veces son leñosos y otras veces no, afectando únicamente a la corteza; sus orígenes en gran parte son desconocidos, algunos pueden ser por hongos o bacterias que ingresan por una herida. Pueden estar ubicados en diferentes partes del fuste y ramas. Los árboles jóvenes pueden presentar retrasos en el crecimiento, desarrollos normales, además de ser mucho más susceptibles a más enfermedades y a la muerte.

- **Pudrición localizada:** La pudrición en los árboles se puede presentar por heridas o zonas muertas del árbol colonizadas por hongos o bacterias, agravando

Página 61 de 98

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Mutis	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 62 de 98	

el estado del mismo y generando complicaciones las cuales pueden estar mezcladas con otros factores de riesgo de caída (fisuras, agallas y demás). Sánchez, Artajo & Septién (2017), mencionan que la descomposición de la madera está fundamentalmente por hongos de pudrición los cuales modifican las propiedades físicas, químicas y mecánicas de la madera, ocasionando una disminución en la resistencia de la madera y por ende fracturas en ramas, tronco y caída del individuo. Si la pudrición está en la zona central del tronco y se expande hacia el exterior de forma concéntrica o excéntrica, se considera que hay una mayor incidencia en la estática del individuo. Existen tres tipos de pudrición, blanca, marrón y blanda.

- **Cuerpo fructífero del hongo:** También conocidos como setas, pueden estar o no presentes en los individuos con síntomas de pudrición. Según Luley (2006), los árboles urbanos usan los indicadores de pudrición cuando no hay setas, los indicadores positivos incluyen champiñones, cavidades abiertas, evidencia de pudrición en partes expuestas de la madera y actividad o nidos de hormigas, pájaros o mamíferos en zonas descompuestas del árbol. Estos cuerpos fructíferos se pueden observar en la albura, usualmente son numerosos y pequeños; en la raíz son un indicador esencial de pudrición (a menos que correspondan a micorrizas), si están en la base del árbol puede significar que la descomposición puede extenderse hasta la raíz, si se presentan en ramas es factible ver un estado de pudrición en las mismas.

- **Gomosis:** La Gomosis es una enfermedad causada por patógenos, estos patógenos atacan principalmente a las ramas y al tronco del árbol, la cual va acompañada con la pudrición de la zona, cuando la anomalía se produce, el árbol

Página 62 de 98

	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 63 de 98	

empieza segregar goma o sustancias densas de colores oscuros. Los árboles que están siendo afectados por esta condición presentan síntomas como baja productividad, decaimiento generalizado, hojas amarillas o clorosis y defoliación. Los patógenos atacan a los árboles especialmente porque se presentan las condiciones ideales para su desarrollo, como la humedad, la temperatura y que el individuo sea vulnerable (Klotz, 1978; Garran, S. 1989; Graham et al. 1999).

10.7.2.3. Variables relacionadas a la raíz

- **Raíz expuesta:** Una raíz expuesta representa aquella condición del sistema radicular, diferente a su estado natural, en la cual no se encuentra cubierta por el suelo, y puede ser resultado de obras de infraestructura, socavación por animales, por procesos de erosión natural o debidos al uso intensivo del sitio por parte de peatones.
- **Pudrición en raíz:** La pudrición de la raíz en los árboles se puede presentar por heridas, zonas muertas del árbol colonizadas por hongos o bacterias (Sánchez, Artajo & Septién 2017) o por pérdida de su raíz pivotante. También puede darse por la alta humedad que presente el suelo donde están establecidos los árboles haciendo que se generen patógenos y por ende la pudrición de las raíces haciendo que al árbol le falten nutrientes llegando a un debilitamiento y empiece a fallar su estructura.
- **Socavación basal:** hace referencia a cavidades en la base del árbol, que comprometen el cuello de la raíz. Estas cavidades pueden ser generadas por la fauna circundante, erosión o defectos en el crecimiento del árbol muchas de estas por la disposición de las raíces, las cuales pueden tomar formas irregulares haciendo que se pierda material parental y se acumule humedad.

Página 63 de 98

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Muta	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 64 de 98	

- **Afectaciones a la raíz:** Cuando se presentan raíces expuestas se pueden denotar daños en esta, entre los más comunes tenemos los cortes, heridas graves, presencia de patógenos y pudrición.

10.7.3. Parametrización de variables numéricas

Dentro de las variables seleccionadas hay variables dasométricas que pueden ser registradas de manera numérica (Imaña-Encinas, 2011). En este caso, se encontraron un total de 6 variables numéricas como lo son el perímetro en la base del árbol, la densidad de la copa, la altura total, altura hasta donde empieza la copa, la inclinación, y la esbeltez, la cual es el resultante de una relación entre la altura total del fuste sobre el DAP dividido en cien.

Para la parametrización de estas variables se requería tener un número homogéneo que permitiera la asignación de valores a estas y así hacer una distribución por rangos; para realizar esto se tomaron los valores de cada variable, donde el 0 será tomado como valor mínimo y 1, el valor máximo de cada variable, posteriormente se divide entre 4, con el fin de generar 4 rangos cada uno del 25%, haciendo más fácil la tarea de hallar los rangos para cada valor de las variables numéricas.

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Muta	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 65 de 98	

Perímetro en la base del árbol	0 - 1.25 m	4
	1.26 - 2.5 m	3
	2.51 - 3.75 m	2
	3.76 - 5 m	1

Densidad de la copa	Sin copa	4
	0 - 25	3
	26 - 50	2
	51 - 71	1

Altura total	0 - 10 m	1
	10.1 - 20 m	2
	20.1 - 30 m	3
	30.1 - 40 m	4

Altura hasta donde empieza la copa	0 - 4 m	1
	4.1 - 8 m	2
	8.1 - 12 m	3
	12.1 - 16 m	4

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Muta	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				 BOGOTÁ JARDÍN BOTÁNICO DE BOGOTÁ
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 66 de 98	

Inclinación	Sin inclinación	0
	0 - 12.5	1
	12.6 - 25	2
	25.1 - 37.5	3
	37.6 - 50	4

La parametrización de esbeltez es el producto de la altura total del fuste sobre el producto del DAP sobre cie, dando este rango de valores que al dividir entre 4, obtenemos la frecuencia de cada uno.

Esbeltez	0 - 26.8	1
	26.9 - 41.1	2
	41.2 - 55.4	3
	55.5 - 69.7	4

10.7.4. Parametrización de variables no numéricas

Para la parametrización de variables no numéricas se debe asignar o definir un mapeo que asigne a cada valor no numérico un valor numérico, para este caso se busca reflejar el grado de afectación de diferentes variables, las cuales tienen sistemas de evaluación descriptiva y un porcentaje de afectación, para otros casos como la forma transversal del fuste y la corteza incluida se toman diferentes factores, en el caso de la forma transversal del fuste se tomó como referencia imágenes y las proyecciones del tomógrafo, en el caso

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Mutis	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 67 de 98	

de la corteza incluida, al no tener una herramienta no destructiva del árbol para evaluar este, se determinó que si un árbol presentaba bifurcaciones o ramificaciones en los primeros 4 metros del fuste se tomaría como si el árbol presentara corteza incluida con una calificación de 4, y si no la presenta, una calificación de 1 ya que se estimó que esta variable aunque no presente ninguna presencia a simple vista, no se puede eliminar teniendo en cuenta que es un factor de riesgo debido a que la única manera de saber si este presenta o no corteza incluida sería una prueba destructiva, para esta parametrización se tomaron en total de 15 variables.

Afectaciones biológicas de la copa	Sin afecciones	0
	Una afectación	1
	Dos afectaciones	2
	Tres afectaciones	3

Grietas, fisuras o rajaduras	0 - 1.25 m	4
	1.26 - 2.5 m	3
	2.51 - 3.75 m	2
	3.76 - 5 m	1

Corteza incluida	Ausente	1
	Presente	4

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Muta	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 68 de 98	

Fibra revirada	No presenta	0
	0 - 20	1
	20.1 - 40	2
	40.1 - 60	3
	60.1 - 80	4

Cavidades	No presenta	0
	0 - 20	1
	20.1 - 40	2
	40.1 - 60	3
	60.1 - 80	4

Cicatrices por poda	No presenta	0
	0 - 20	1
	20.1 - 40	2
	40.1 - 60	3
	60.1 - 80	4

	Cuatro o más afectaciones	4
--	---------------------------	---

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Muta	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 69 de 98	

Afectaciones biológicas al fuste	Tres afectaciones	3
	Dos afectaciones	2
	Una afectación	1
	Sin afectación	0

Pudrición de la raíz	No presenta	0
	0 - 20	1
	20.1 - 40	2
	40.1 - 60	3
	60.1 - 80	4

Socavación basal	No presenta	0
	0 - 20	1
	20.1 - 40	2
	40.1 - 60	3
	60.1 - 80	4

Raíz expuesta	No presenta	0
	0 - 20	1
	20.1 - 40	2

	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 70 de 98	

	40.1 - 60	3
	60.1 - 80	4

Afectaciones a la raíz	No presenta	0
	0 - 20	1
	20.1 - 40	2
	40.1 - 60	3
	60.1 - 80	4

El puntaje para la parametrización de las especies se debió al análisis retrospectivo de las especies con mayor incidencia de caída en la ciudad de Bogotá según Parra, C. (2022), donde las especies objeto de estudio fueron catalogadas en orden jerárquico de eventos de volcamiento, teniendo a la Acacia como la de mayor número de volcamientos seguida del Ciprés y por último del Eucalipto.

Especie	<i>Acacia melanoxydon</i>	3
	<i>Cupressus lusitanica</i>	2
	<i>Eucalyptus globulus</i>	1

La parametrización para el tipo de fuste se hizo en base a si el árbol era bifurcado o no, en los datos levantados hasta el momento se lograron identificar 8 individuos bifurcados,

Página 70 de 98

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Muta	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				 BOGOTÁ JARDÍN BOTÁNICO DE BOGOTÁ
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 71 de 98	

entonces lo que se decidió para el análisis preliminar es que estos árboles serian tratados con algunos datos compartidos con el fin de ser tratados como fustes monopódicos, pero con la salvedad de que son árboles bifurcados, estos estén debidamente identificados y si bien comparten algunos datos tienen características diferentes.

Tipo de fuste	Monopódico	1
	Bifurcado basalmente	2

La parametrización de la densidad de la copa se hizo a partir de las observaciones que se hacen en campo en donde según el árbol se podía determinar la densidad de la copa respecto a la Figura 1 en donde se podía determinar la densidad de esta, en este parámetro no se toma el 100% debido a que no hay árboles que presenten esta condición.

Densidad de la copa	Sin copa	4
	0 - 25 %	3
	26 - 50 %	2
	51 - 75 %	1

La parametrización de las ramas secas sigue una metodología diferente debido a que esta se divide en tres niveles de ramas secas, Nivel 1: Ramas terciarias secas, Nivel: Ramas secundarias secas y Nivel 3: Ramas primarias secas; luego de identificar en nivel de ramas afectado se multiplica por la proporción expuesta en la Tabla 14 y ese es nuestro resultado para ver dentro de qué rango está cada árbol evaluado

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Muta	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 72 de 98	

Ramas secas	0 - 20 %	0.1
	21 - 40 %	0.3
	41 - 60 %	0.5
	61 - 80 %	0.7
	81 - 100 %	0.9

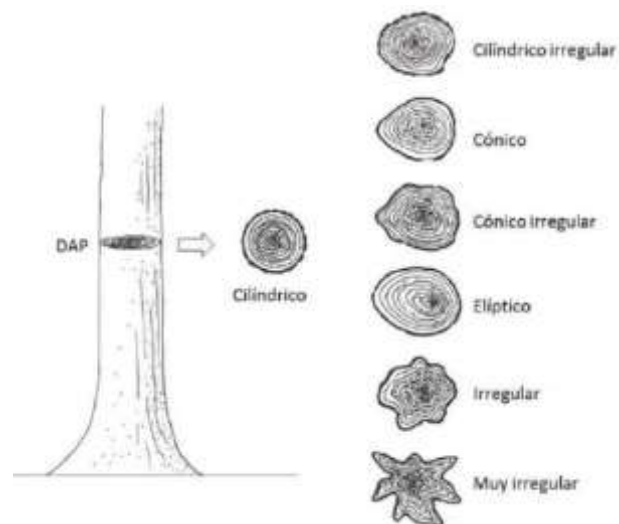
La parametrización de la asimetría de la copa se tomó a partir de la proyección de la copa la cual se hace con ocho puntos cardinales y se calcula el centro de gravedad, en este caso será el centro de gravedad calculado que es donde debería estar el fuste en condiciones normales esto mediante el programa con ayuda de este mismo se calcula la distancia que hay entre el centro de gravedad perfecto que es el del fuste principal y el centro de gravedad calculado, con estos valores hallados se hace la división entre 4 y se hallan los rangos para asignar el puntaje para la parametrización.

Asimetría de la copa	0 - 2	1
	2.1 - 4	2
	4.1 - 6	3
	6.1 - 8.5	4

Para la forma transversal del fuste se tomó como referencia la clasificación que le dio IURIS Ambiental, donde se pueden observar un total de siete imágenes cada una con su representación. Figura 18.

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Muta	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 73 de 98	

Figura 18. Forma del fuste en la sección transversal



Fuente: AURIS Ambiental. 2020

Forma transversal del fuste	Cilíndrico	1
	Cilíndrico irregular	2
	Cónico	3
	Cónico irregular	4
	Elíptico	5
	Irregular	6
	Muy irregular	7

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE <i>Jardín Botánico José Celestino Mutis</i>	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				 BOGOTÁ JARDÍN BOTÁNICO DE BOGOTÁ
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 74 de 98	

10.7.5. Descripción general de los individuos evaluados

Tipo de tallo

Especie	Bifurcado basalmente	Monopódico	Total general
Acacia melanoxylon R.Br.	6	11	17
Cupressus lusitanica Mill.	2	4	6
Eucalyptus globulus Labill.		9	9
Total general	8	24	32

Diámetro normal (1.30 m)

Especie	Promedio de Diámetro a la altura del pecho DAP (cm)
Acacia melanoxylon R.Br.	47,41
Cupressus lusitanica Mill.	38,50
Eucalyptus globulus Labill.	98,66

Altura promedio (m)

Especie	Promedio de Altura total del fuste (m)
Acacia melanoxylon R.Br.	15,52
Cupressus lusitanica Mill.	15,33
Eucalyptus globulus Labill.	26,36

Centralidad de la copa respecto a la base del fuste

Especie	No Centrada	Centrada	Bifurcados	Total general
Acacia melanoxylon R.Br.	6	5	6	17
Cupressus lusitanica Mill.		4	2	6

Página 74 de 98

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Muta	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 75 de 98	

Eucalyptus globulus Labill.	2	7	9
Total general	8	16	8

Grado de inclinación del árbol

Especie	Inclinación fuste (grados desde la vertical)
Acacia melanoxylon R.Br.	11,00
Cupressus lusitanica Mill.	4,00
Eucalyptus globulus Labill.	9,00
Total general	24

En relación con las variables visuales externas, su análisis individual determina la existencia de individuos principalmente monopódicos de grandes proporciones, de acuerdo a los indicadores dasométricos diámetro y altura total. Todos los individuos monopódicos presentan en un grado de inclinación moderado, entre 4 y 11 grados, siendo la especie que más presenta esta condición la Acacia melanoxylon. De acuerdo con los resultados, el grado de inclinación no determina necesariamente, la existencia de una copa descentrada o desplazada hacia algún sector del radio de influencia de los árboles.

10.8. Valoración interna

Para la caracterización interna de la madera se utilizó un tomógrafo sónico PiCUS 3 en la base del árbol, a 30 cm aproximadamente del suelo, de donde se obtuvo un tomograma en formato de imagen, que representa regiones de la sección donde la velocidad de desplazamiento de la onda, genera una diferencia con respecto a otras áreas. Esta

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Muta	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 76 de 98	

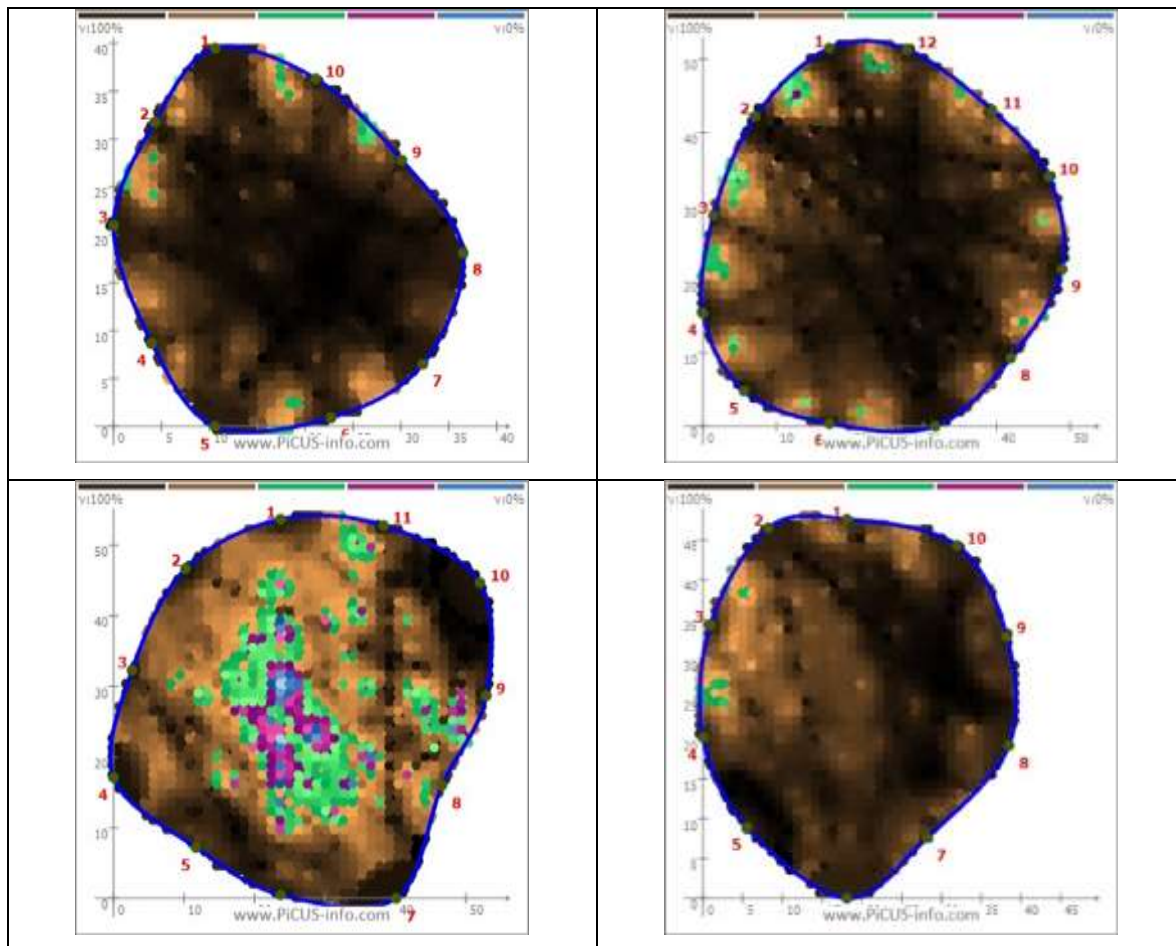
diferencia en las áreas puede distinguir zonas de velocidad normal para una madera en buen estado, y zonas con velocidad menor, donde puede intuirse un decaimiento en la calidad de la madera. La información generada por la imagen, se puede complementar con las tablas de velocidades de onda generadas automáticamente para los 32 individuos evaluados.

A continuación, se presentan los resultados gráficos de la tomografía y la resistografía efectuada a cada uno de los 32 árboles evaluados. En el caso de la tomografía, se presenta la sección del tronco con las regiones clasificadas por color, de acuerdo a la velocidad de propagación de la onda en su interior. Por su parte la figura de resistencia del árbol, presenta la curva proporcional de la fuerza que ejerce la aguja para avanzar y rotar dentro de la madera del árbol evaluado. En este caso, la caída de la curva de resistencia y el cambio de color de la sección posibilitan la identificación de un decaimiento en la calidad de la madera.

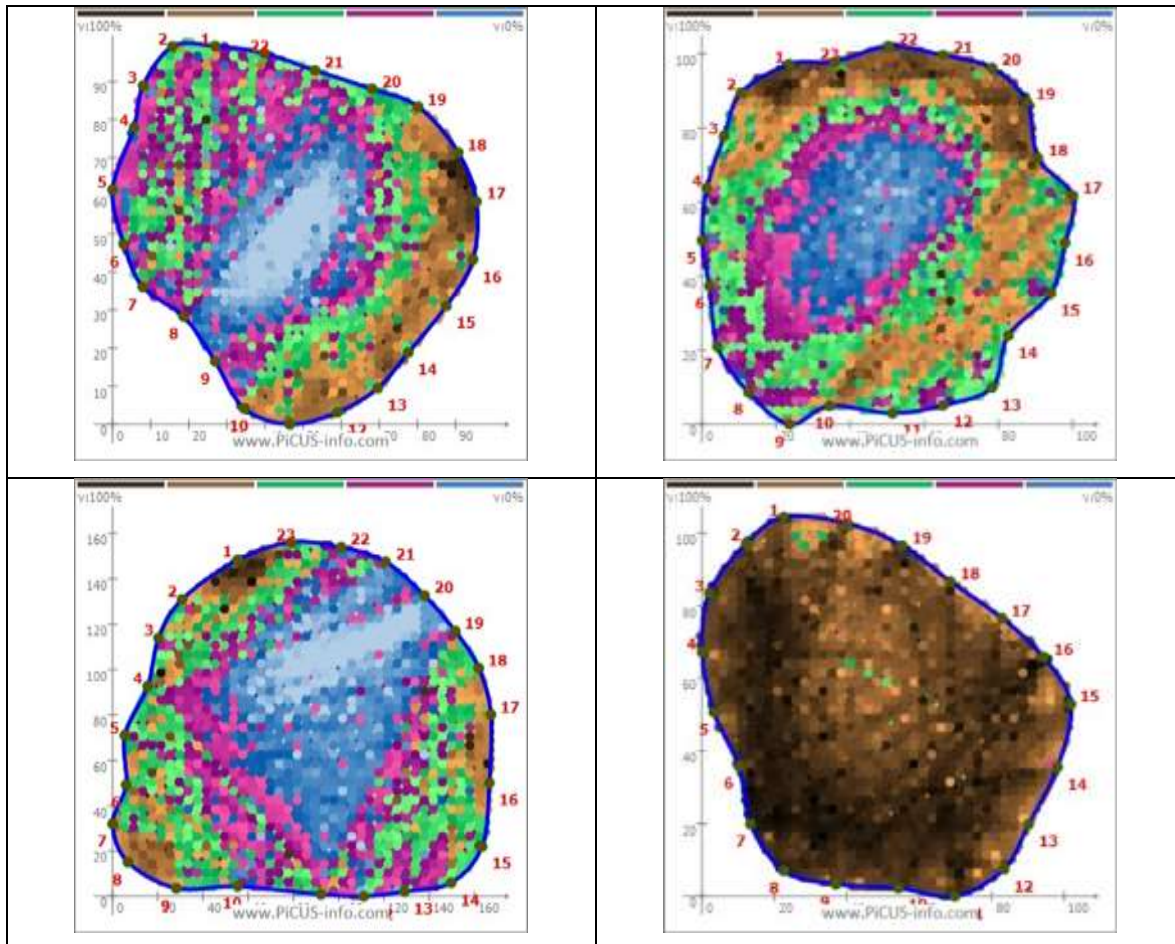
10.8.1. Tomogramas:

10 de las secciones de los 32 árboles evaluados, presentaron velocidades de onda asociadas a madera que puede calificarse en buen estado; en algunas de las tomografías se evidenciaron zonas o regiones pequeñas con disminución en la velocidad de onda, que no comprometen la capacidad de resistencia del fuste. En el resto de las imágenes se detectan áreas con disminución en las velocidades de onda que determinan la presencia de zonas con decaimiento de la madera, algunas de ellas con grandes proporciones que podrían influenciar la generación de un evento de falla.

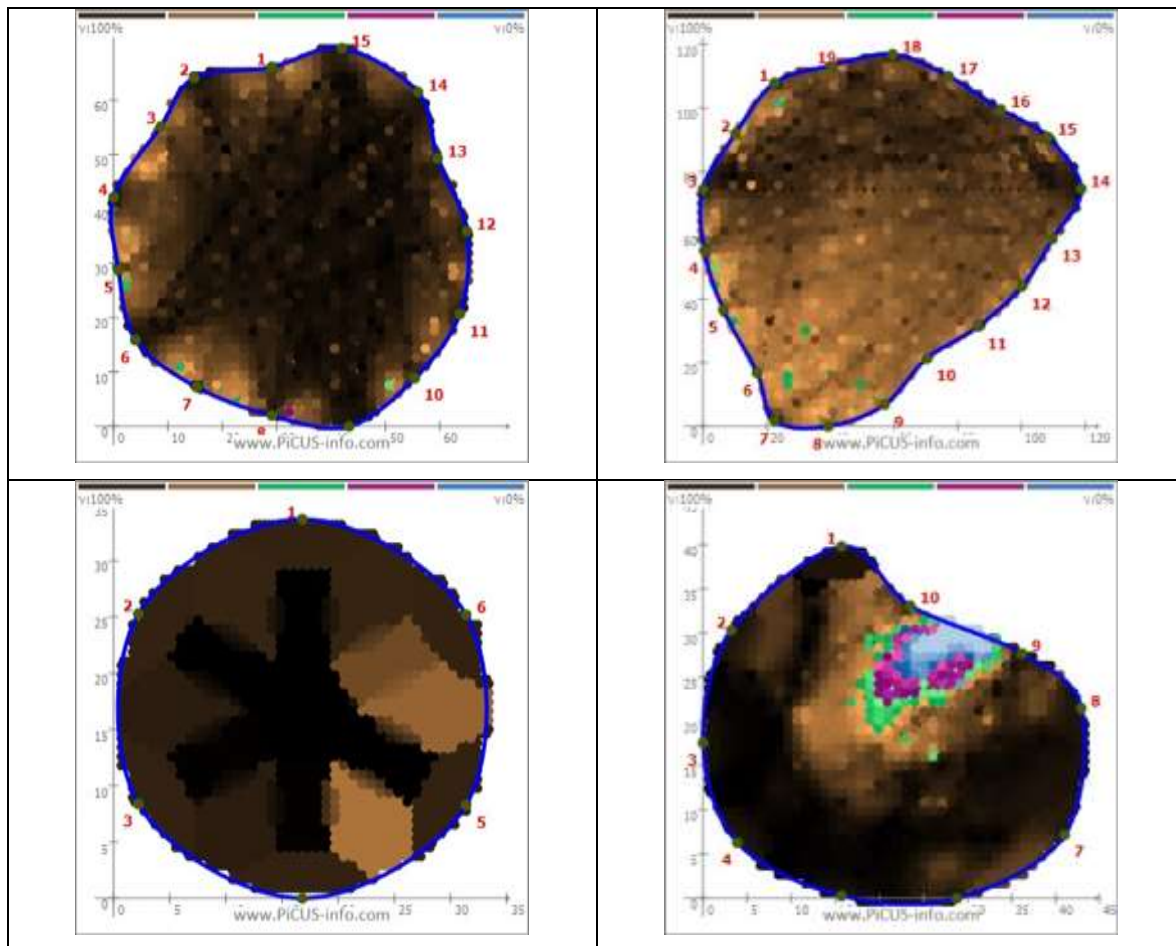
	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 77 de 98	



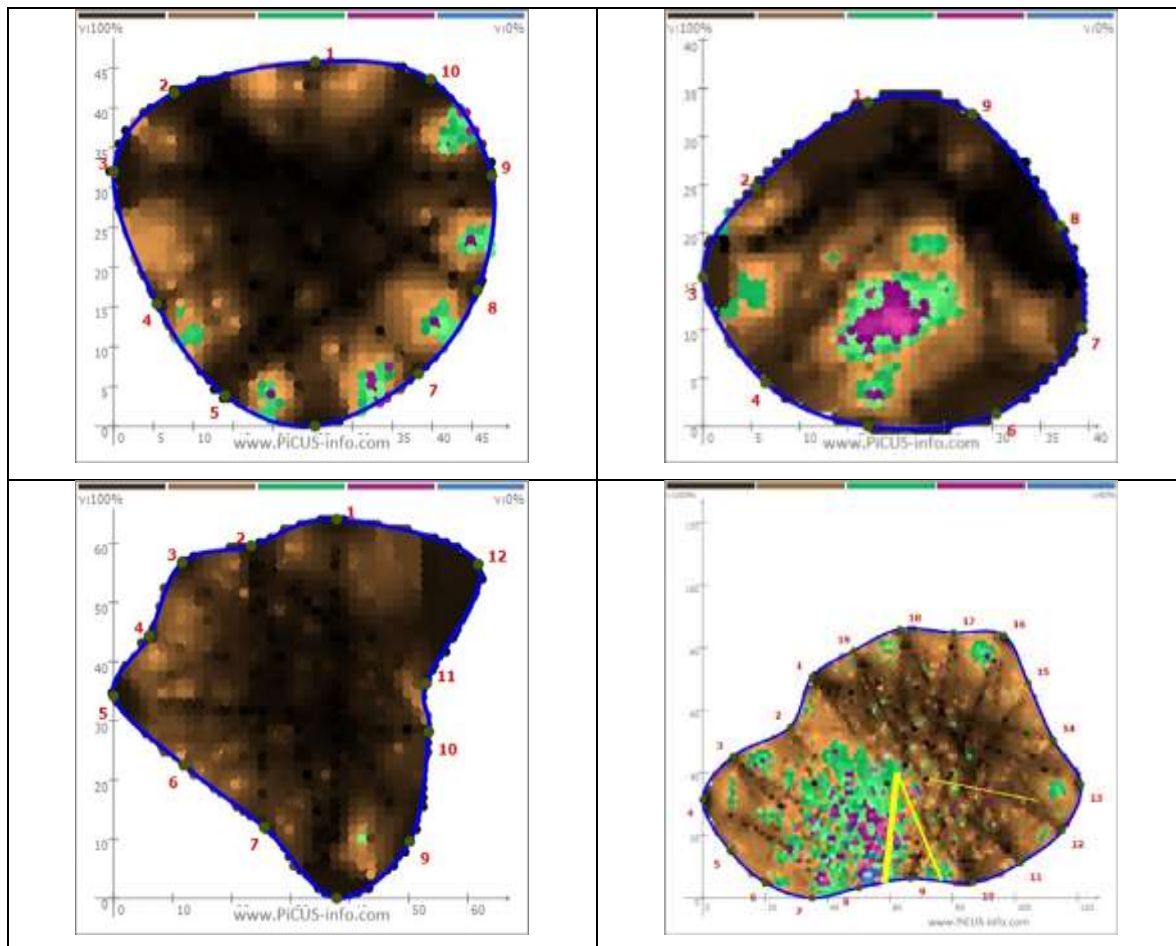
	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 78 de 98	



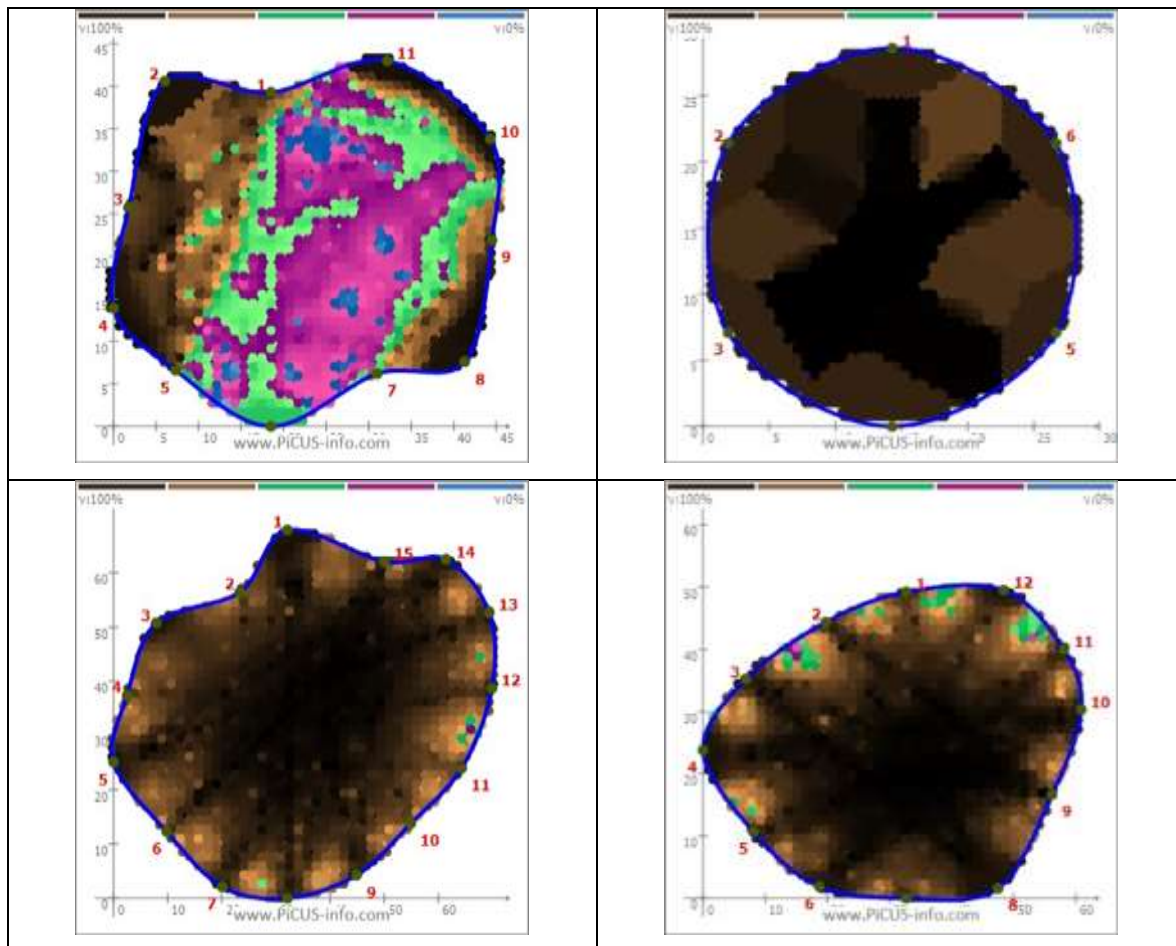
	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS			
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO			
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación			
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 79 de 98



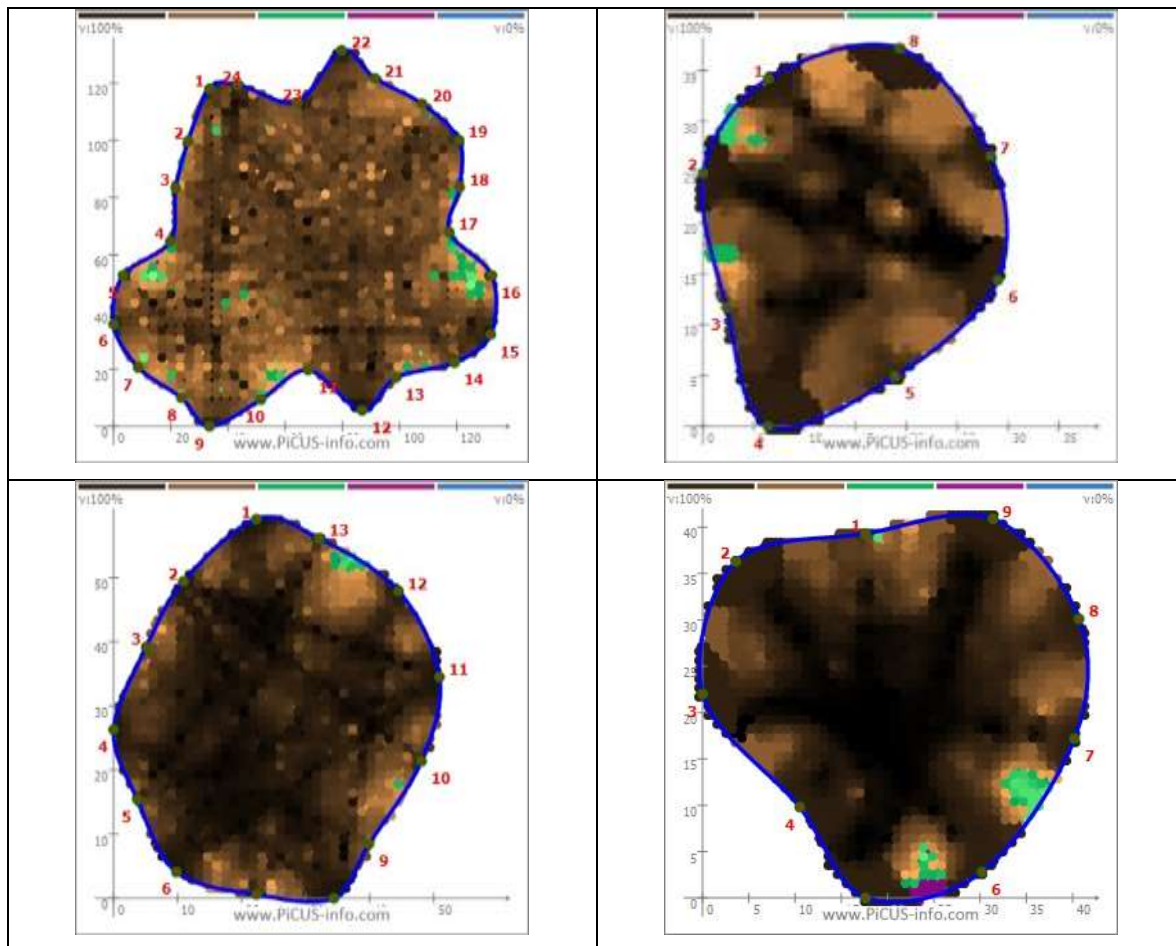
 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Muta	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS			
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO			
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación			
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 80 de 98



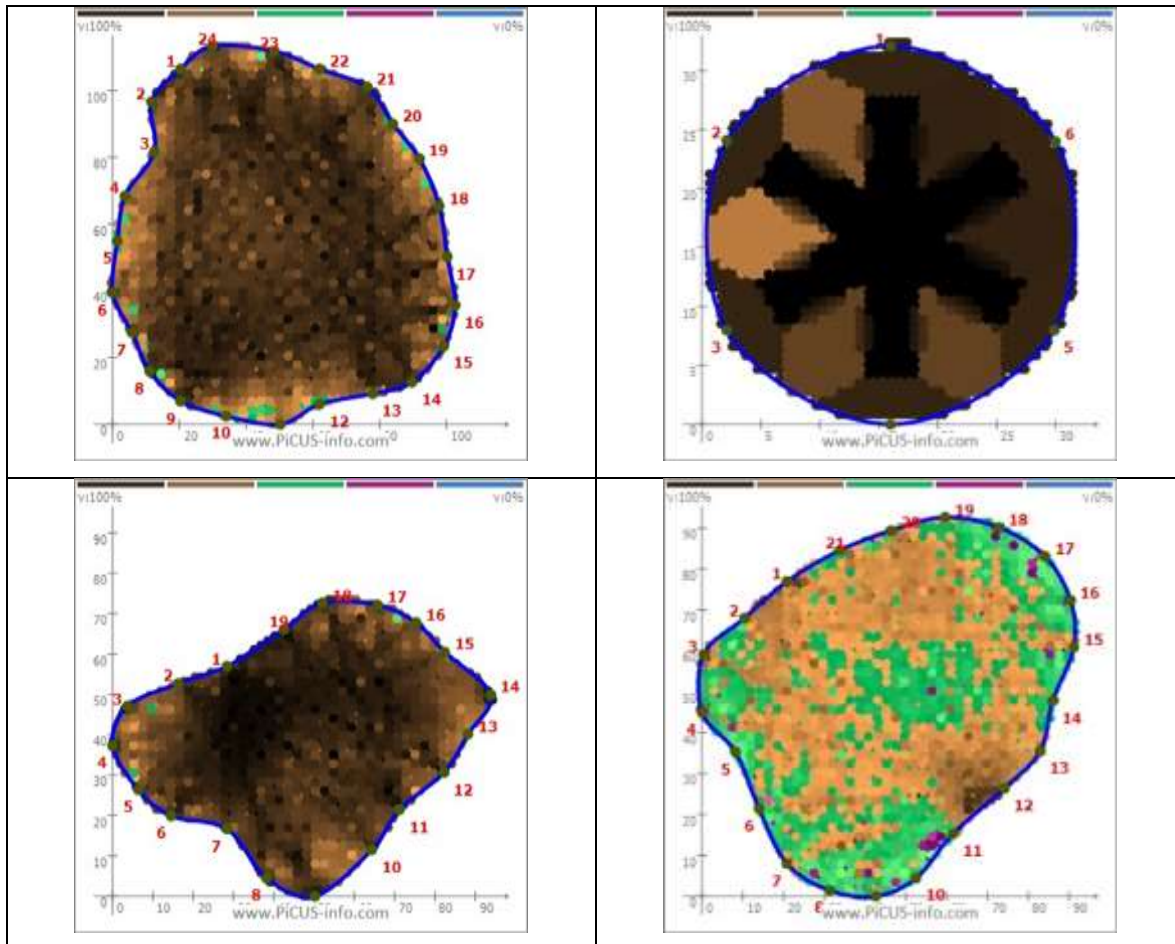
	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS			
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO			
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación			
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 81 de 98



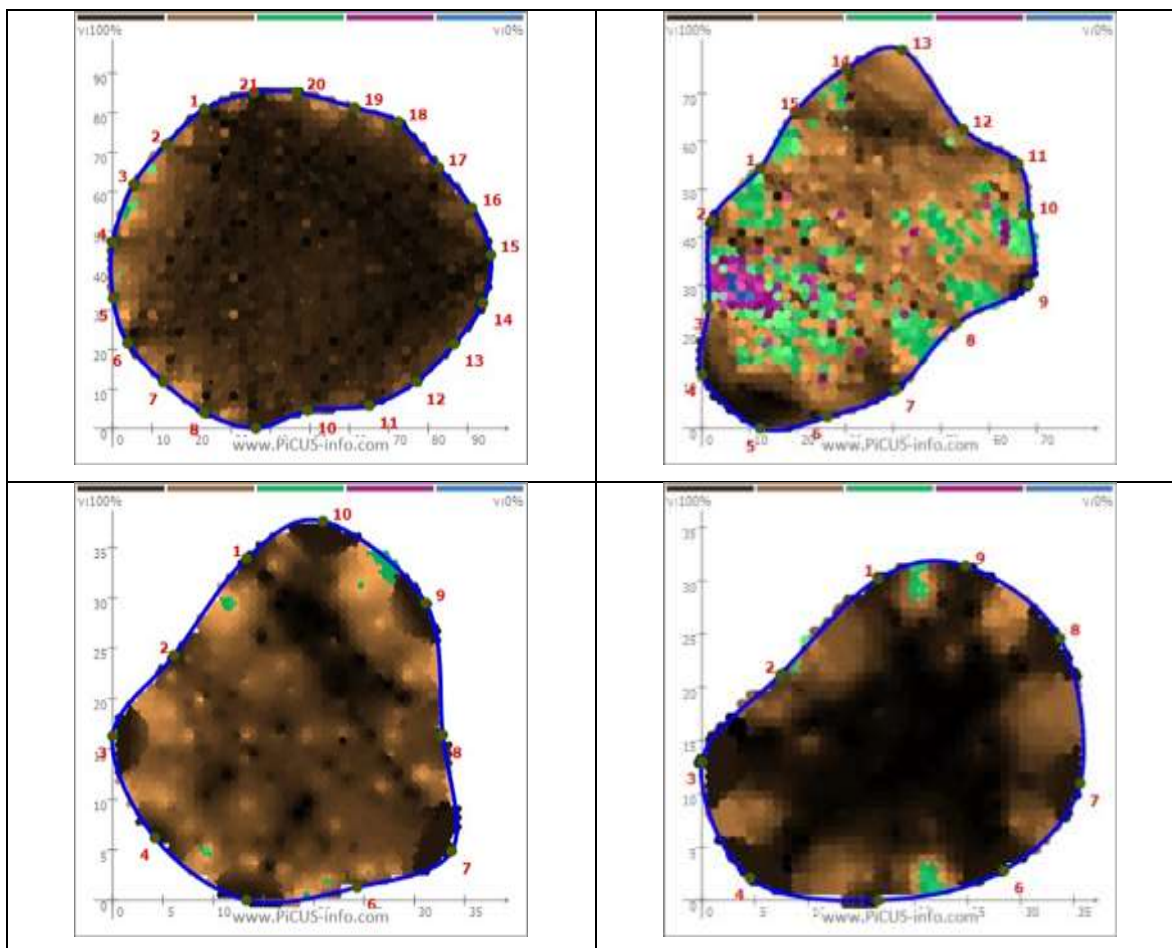
	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS			
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO			
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación			
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 82 de 98



 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Mutis	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS			
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO			
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación			
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 83 de 98



	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS			
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO			
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación			
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 84 de 98



10.8.2. Penetrografías

El uso de la tecnología para el análisis de resistencia con el Penetrógrafo, corroboró el decaimiento de la madera en las secciones exhibidas a través del tomógrafo. Algunas de las franjas de decaimiento en la sección evaluada resultan pequeñas en comparación con

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Muta	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				 BOGOTÁ JARDÍN BOTÁNICO DE BOGOTÁ
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 85 de 98	

toda la sección, no significando que exista un compromiso del estado interno del árbol con una posible falla, pues se debe reconocer que el análisis representa solo una sección del tronco. En total, 16 de los árboles evaluados a través de ésta tecnología contenían secciones con pérdida en la resistencia de la madera.

10.9. Análisis de regresión para un modelo de Riesgo

La interpretación de las afectaciones vistas en las tomografías se presentan en la Tabla 6 donde se estableció una calificación para la presencia o ausencia de afectaciones al fuste, asignado “0” si no presenta afectaciones, o “1” en caso de la presencia de algún tipo de anomalía expresada por la escala de cuatro tonos de color arrojadas por el tomograma (azul, morado, rosado y café claro). Estas tonalidades representan el % de velocidad de desplazamiento de la onda a través de la madera evaluada con el tomógrafo sónico, distinguiendo a la madera en buen estado, de las zonas que presentan algún tipo de anomalía o decaimiento, a partir de la cual es posible asignar un nivel de afectación.

Tabla 6. Presencia y área de afectación en % para el área transversal del fuste

	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS			
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO			
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación			
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 86 de 98



Código SIGAU	Presencia	Sano	% Afectado 1	% Afectado 2	% Afectado 3	% Afectado 4	% Afectación Total	Calificación
801110000068	1	3.057,12	1.888,43	477,78	213,13	0,00	45,76	2
1010202000161	1	3.741,14	1.096,14	673,19	76,31	0,00	33,04	2
1011705000044	0	5.575,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0
1021104000119	1	0,00	2.793,66	2.147,66	634,53	0,00	100,00	4
2021001000402	1	3.616,00	1.038,00	237,00	301,00	314,00	34,33	2
2021001000688	0	5.201,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0
8010803001145	1	0,00	5.074,93	0,00	0,00	0,00	100,00	4
8011005001080	1	3.360,00	1.586,00	136,00	119,00	0,00	35,40	2
8012206000995	1	739,58	3.810,19	0,00	0,00	0,00	83,74	4
8012206000998	0	4.469,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0
9013001000319	1	2.402,20	1.987,05	138,38	0,00	0,00	46,94	2
9013303000134	1	0,00	4.318,27	150,78	0,00	0,00	100,00	4
10011005001371	1	0,00	4.758,86	624,43	0,00	0,00	11,60	1
11012003000125	1	2.064,28	1.789,07	177,23	50,00	0,00	49,41	2
11012003000167	1	2.413,41	2.211,02	51,15	0,00	0,00	48,38	2
11012402004941	0	5.248,77	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0
11012405000375	1	1.441,05	1.320,02	0,00	910,74	1.069,33	69,61	3
11012405000407	1	0,00	1.107,16	1.066,02	1.082,00	1.337,93	100,00	4
13011802000001	1	607,53	1.293,94	1.141,60	1.880,26	325,44	88,43	4
13011902000303	1	2.478,00	1.736,00	64,00	0,00	0,00	42,08	2
15010202000790	1	2.654,91	1.670,71	83,66	0,00	0,00	39,79	1
15010207000125	1	171,07	2.843,80	652,07	266,48	81,54	95,74	4
15010301000365	1	2.330,85	2.321,40	192,38	0,00	0,00	51,89	1
19011303000214	1	3.817,00	920,75	97,61	0,00	0,00	21,06	1
10011303000931	1	53,26	686,41	1.315,00	1.511,39	1.900,00	99,03	4
13011802000301	1	558,95	5.768,50	1.386,32	554,36	144,17	93,36	4
13011804000840	0	5.408,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1
13011902000305	1	1.056,11	2.951,88	845,46	366,21	188,34	80,47	3
1302100400368	0	0,00	4.844,63	0,00	0,00	0,00	0,00	0
15010207000124	1	748,39	3.547,75	89,44	0,00	0,00	82,94	1
2021001000687	0	4.385,58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0
9013001000320	1	1.704,00	2.335,00	94,00	0,00	0,00	58,77	1

Por su parte, el análisis de regresión efectuado a través del programa R, con un nivel de significancia del 95%, para tres variables independientes que representaron la evaluación subjetiva del nivel de riesgo, la calificación asignada para el porcentaje (%) de afectación de la tomografía, y la calificación por el tomograma (Tabla 7), determinó que, el modelo de la calificación subjetiva presenta un valor p mayor a 0,05, indicando que el modelo no posee variables predictoras o dicho de otra forma, es un modelo de solo intersección, mientras que los modelos 1 y 2 si muestran un ajuste por parte de las variables con valores de 0,0145 y 0,0080 respectivamente, siendo válidos.

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE <i>Jardín Botánico José Celestino Mutis</i>	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 87 de 98	

Tabla 7. Validación del modelo de regresión

No.	Variables	R2	p
1	% Afectación en Tomografía	0,4981	0,0145
2	Calificación por tomografía	0,5409	0,0080
3	Calificación Subjetiva Conjunta	0,2747	0,1289

De otro modo, para las 21 variables explicativas evaluadas en relación con cada una de las variables independientes, se tiene que respecto a la variable “% de afectación de la tomografía no parametrizada”, se encontró que 4 de las 21 variables aplicadas, son significativas, siendo la variable Especie con 0,026, la que menos aporta al modelo, en tanto que, Tipo de Fuste 0.028, Pudrición de raíz 0,046 y Forma del Fuste en la sección Transversal con 0,005, son las que mejor aportan al modelo. El resto de las variables al presentar una probabilidad mayor a 0.05, por lo que no representan significancia para el modelo propuesto (Tabla 8).

Tabla 8. Coeficientes de regresión usando como variable independiente los porcentajes de afectación de la tomografía no parametrizados

	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 88 de 98	

Coefficientes	Estimate	Error	t value	Pr (> t)
(Intercepción)	73,526	80,003	0,919	0,370
Especie	-31,583	13,037	-2,423	0,026*
Tipo de Fuste	33,602	14,037	2,394	0,028*
Densidad de la copa	9,217	8,462	1,089	0,290
Ramas secas	-13,777	9,110	-1,512	0,148
Síntomas fisiológicos por afectaciones biológicas	-3,461	12,313	-0,281	0,782
Asimetría de la copa	9,308	8,167	1,140	0,269
Perímetro en la base del árbol	-13,089	14,691	-0,891	0,385
Esbeltez	-2,531	10,368	-0,244	0,810
Altura total del fuste	-24,930	15,661	-1,592	0,129
Inclinación fuste	2,859	7,559	0,378	0,710
Forma del fuste en la sección transversal	19,315	5,992	3,224	0,005**
Grietas, fisuras o rajaduras	6,675	8,799	0,759	0,458
Corteza Incluida	-1,780	4,962	-0,359	0,724
Fibra del fuste revirado	2,780	6,424	0,433	0,670
Cavidades	-10,530	10,936	-0,963	0,348
Cicatrices por poda	-11,083	7,220	-1,535	0,142
Afectaciones biológicas al fuste	1,211	5,852	0,207	0,838
Pudrición en raíz	26,700	12,451	2,144	0,046*
Socavación basal	42,047	31,936	1,317	0,204
Raíz expuesta	-14,643	18,315	-0,800	0,434
Afectaciones la raíz	28,065	13,609	2,062	0,054 .

Cuando se efectuó la interacción con la variable “% de afectación de la tomografía parametrizados”, se encontraron 4 variables relevantes por su nivel de significativas para el modelo, siendo estas, la Especie con 0.045, Pudrición de Raíz con 0,032, Forma del Fuste en la sección Transversal con 0.016 y las cicatrices por poda con 0.010, el resto de las

	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 89 de 98	

variables al presentar una probabilidad mayor a 0.05 no representan significancia para el modelo propuesto (Tabla 9).

Tabla 9. Coeficientes de regresión usando como variable independiente los porcentajes de afectación de la tomografía parametrizados

Coeficientes	Estimate	Error	t value	Pr (> t)
(Intercepción)	3,203	2,831	1,131	0,273
Especie	-0,993	0,461	-2,152	0,045*
Tipo de Fuste	0,503	0,497	1,012	0,325
Densidad de la copa	0,279	0,299	0,931	0,364
Ramas secas	-0,279	0,322	-0,865	0,398
Síntomas fisiológicos por afectaciones biológicas	-0,417	0,436	-0,957	0,351
Asimetría de la copa	0,271	0,289	0,938	0,361
Perímetro en la base del árbol	-0,481	0,520	-0,925	0,367
Esbeltez	-0,180	0,367	-0,491	0,630
Altura total del fuste	-0,543	0,554	-0,981	0,340
Inclinación fuste	0,124	0,268	0,465	0,648
Forma del fuste en la sección transversal	0,566	0,212	2,671	0,016*
Grietas, fisuras o rajaduras	0,308	0,311	0,988	0,336
Corteza Incluida	0,126	0,176	0,717	0,482
Fibra del fuste revirado	0,100	0,227	0,440	0,665
Cavidades	-0,745	0,387	-1,926	0,070
Cicatrices por poda	-0,730	0,256	-2,858	0,010*
Afectaciones biológicas al fuste	0,256	0,207	1,238	0,232
Pudrición en raíz	1,026	0,441	2,328	0,032*
Socavación basal	1,579	1,130	1,397	0,180
Raíz expuesta	-0,146	0,648	-0,226	0,824
Afectaciones la raíz	0,847	0,482	1,759	0,096

En el análisis de las variables con respecto a la calificación subjetiva, mostró que no hay ninguna relación entre las variables, esta variable dependiente no muestra valores

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Mutis	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				 BOGOTÁ JARDÍN BOTÁNICO DE BOGOTÁ
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 90 de 98	

significativos a la ecuación, sin encontrar valores de probabilidad menores al 0.05, de hecho, el valor más cercano es de 0.12, doblando así el valor mínimo para tomar esta variable (Tabla 10).

Tabla 10. Coeficientes de regresión usando como variable independiente la calificación subjetiva

Coeficientes	Estimate	Error	t value	Pr (> t)
(Intercepción)	2,801	1,878	1,492	0,153
Especie	0,097	0,306	0,317	0,755
Tipo de Fuste	0,286	0,329	0,867	0,397
Densidad de la copa	0,208	0,199	1,047	0,309
Ramas secas	-0,105	0,214	-0,489	0,631
Síntomas fisiológicos por afectaciones biológicas	0,204	0,289	0,707	489,000
Asimetría de la copa	-0,309	0,192	-1,613	0,124
Perímetro en la base del árbol	-0,377	0,345	-1,093	0,289
Esbeltez	0,083	0,243	0,342	0,736
Altura total del fuste	-0,253	36.755,000	-0,687	0,501
Inclinación fuste	0,241	0,177	1,361	0,190
Forma del fuste en la sección transversal	-0,036	0,141	-0,254	0,803
Grietas, fisuras o rajaduras	0,207	0,206	1,003	0,329
Corteza Incluida	-0,036	0,116	-0,306	0,763
Fibra del fuste revirado	0,230	0,151	1,524	0,145
Cavidades	0,048	0,257	0,186	0,854
Cicatrices por poda	-0,152	0,169	-0,897	0,382
Afectaciones biológicas al fuste	0,182	0,137	1,323	0,202
Pudrición en raíz	0,395	0,292	1,352	0,193
Socavación basal	-0,824	0.74949	-1,099	0,286
Raíz expuesta	0,571	0,430	1,328	0,201
Afectaciones la raíz	0,212	0,319	0,665	0,515

	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 91 de 98	

Teniendo en cuenta la relación de las variables obtenidas en los modelos de regresión se pueden identificar un total de 8 variables en los dos modelos, de las cuales tres (3) reaparecen en los dos modelos, las cuales corresponden a la Forma del Fuste en la sección transversal con valores de 0.005 y 0.016 respectivamente, la Pudrición de la raíz con valores de 0.046 y 0.032 respectivamente y la Especie con valores 0.026 y 0.045, mostrando así que las variables dependientes muestran una similitud. De otra parte, las variables que no se repiten corresponden a las cicatrices por poda con 0.010 y el Tipo de Fuste 0.028. Otras variables que se aproximaron al nivel de probabilidad establecido fueron las Afectaciones a la raíz con 0.054 y las cavidades, que tuvo una probabilidad de 0.07.

11. DISCUSIÓN

Las variables de Forma del Fuste, Pudrición de la raíz y Especie, al ser las más significativas para los modelos realizados, muestran una importancia relativa en relación con la valoración del riesgo de caída de los árboles estudiados. En este sentido, las variables de la zona de análisis de la raíz resultan tener una correlación con los datos obtenidos del tomógrafo, teniendo en cuenta la cercanía del punto de toma de la tomografía a esta zona de análisis, donde probablemente se logran apreciar las repercusiones de la pudrición de la raíz o las afectaciones a la misma en las condiciones internas de la madera del fuste en su base. Sin embargo, es importante resaltar que estas variables están asociadas claramente a la probable falla del fuste, pero no involucra necesariamente los elementos de la copa que podrían potenciar la ocurrencia de una falla, por el colapso de esta parte de la estructura de un árbol.

	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 92 de 98	

Por otra parte, se puede observar que muchas de las variables no se ajustan a la regresión lineal, sin embargo, se encuentran algunas variables relacionadas entre sí, como el tipo de fuste y corteza incluida, ya que a partir del muestreo, se encontró que los árboles bifurcados tienen una mayor probabilidad de a presentar corteza incluida entre las bifurcaciones, generando una condición de debilitamiento de las uniones, tal como ha sido señalado por Drenou, (2001), refiriéndose a las bifurcaciones accidentales, ya que pueden convertirse en puntos de debilidad mecánica potencial sustentada en que los ejes de la ramificación al crecer en la misma dirección desarrollan una competencia mutua.

De igual forma, se encontró una relación entre la densidad de las ramas y las ramas secas, siendo evidente el porqué de esta relación, ya que a medida que aumenta el nivel de las ramas secas disminuye la densidad de la misma, estableciéndose una relación inversa e indicadora de un mayor nivel de amenaza de falla en ambos casos; otra relación encontrada fue la inclinación del fuste y la altura total del árbol relacionadas con la asimetría de la copa, la cual puede ser resultado de que un árbol inclinado tienda a generar una copa fuera de su eje o que esta situación sea debida a un proceso progresivo por la pérdida de verticalidad del individuo, además de que algunos árboles se inclinan en búsqueda de luz, siendo de algún modo la copa la causante de dicha inclinación; por último, se encuentra que debido a la arquitectura de los mismos individuos existe una relación entre el perímetro de los árboles y la especie ya que por ejemplo los Eucaliptos presentan por lo general mayores diámetros en comparación que las otras especies y esta condición puede influenciar las otras variables, requiriendo un análisis particular más exhaustivo.

	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 93 de 98	

Cuando se toma como variable dependiente el porcentaje de afectación de la tomografía y la calificación parametrizada de dicha afectación, se encuentran 4 variables correlacionadas, 3 de estas se repiten en los dos modelos; sin embargo, cuando se parametriza la tomografía se puede ver como aumenta en más de 4 puntos porcentuales la R2 ajustada en el modelo y adicionalmente, trata de ajustar otras dos variables, lo cual con cual indica que es más preciso ajustar los datos a un parámetro que permitan ampliar el rango, y así ajustarse más a la regresión lineal. Lo anterior también nos puede inferir un error en la parametrización de las variables independientes, en la cual se recomienda hacer más énfasis en estas, considerando que son el pilar fundamental de los muestreos de campo.

Por último en relación a las variables que resultaron aportar más a los modelos relacionados con los tomogramas, se tiene que posiblemente la Forma del fuste en la sección transversal, esté correlacionada con las variables independientes asignadas, teniendo en cuenta que la geometría del árbol y algunos de los individuos con mayores afectaciones posee formas más irregulares según los datos del muestreo; por otra parte, la irregularidad de la forma transversal del fuste puede relacionarse con árboles en un estado de maduración más avanzado y en una condición más susceptible al ataque de patógenos generadores de pudrición o decaimiento de la madera.

12. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Muta	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 94 de 98	

- Las variables explicativas más significativas que se ajustan mejor al modelo con relación a los resultados de las tomografías son Forma del fuste en la sección transversal y la pudrición de raíz.
- Los resultados de la afectación obtenidos a partir del tomógrafo se acomodan a un modelo explicado a partir de las variables tomadas en campo.
- Es importante seguir con la ampliación de la muestra tanto de individuos por especie como de individuos bifurcados para obtener una muestra equivalente de estas dos características.
- Tener en cuenta los emplazamientos para inclusión de esta variable a la regresión lineal ya que este factor limita el crecimiento de las raíces y por ende limita la absorción de nutrientes y el crecimiento de la copa, haciendo que el árbol sufra de deficiencias fotosintéticas y minerales para su desarrollo.
- Incluir pruebas de regresión no paramétricas lo cual aporte a ajustar las variables y dar una mejor correlación entre estas, disminuyendo el error y aumentando así los resultados significativos de esta.
- Los parámetros relacionados con la copa no presentan una correlación con la afectación mostrada en la tomografía, por ende, se recomienda el uso de una variable dependiente diferente para relacionar las variables de copa.

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Muta	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 95 de 98	

- El uso de las variables dispuestas en las diferentes fuentes de información como SIGAU o fichas técnicas de tala no son recomendables para hacer este tipo de estudios ya que las variables no coinciden con la realidad del árbol en el momento del muestreo en campo y carecen de algunas variables evaluadas en este estudio.

13. AGRADECIMIENTOS

Al equipo directivo del Jardín Botánico, Dr. Martha Perdomo y al subdirector Técnico – Operativo de la entidad, ing. Germán Darío Alvarez; al equipo de Investigaciones Aplicadas de la Subdirección Técnica Operativa. A la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad del Medio Ambiente, profesores Cesar Augusto Polanco y Gustavo Andrés Fuentes Solano, a los estudiantes de ingeniería Forestal Luisa Fernanda Lozano, Esteban Saavedra, Maryin Vivas y Angie Moncada. Al equipo SIGAU y los operarios y personal técnico que apoyaron las labores logísticas y de campo por parte del Jardín Botánico de Bogotá.

14. BIBLIOGRAFÍA

Clark, J.R. Matheney, N.P. GRoss, G., Wake, V. (1997), A model of urban forestl sustainability. J. Arboriculture. 23 (1), 17 – 30

Davison A., J.B. Kirkpatrick (2014). Risk and the arborist in the remaking of the Australian urban forest. Geogr. Res., 52 (2) (2014), pp. 115-122

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. AMBIENTE Jardín Botánico José Celestino Muta	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 96 de 98	

Guevara, C. M., C., (2014). Estudio para la identificación de individuos arbóreos con susceptibilidad al volcamiento en la ciudad de Bogotá. Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia.

JBB Universidad de Los Andes (2020). Manual de Coberturas Vegetales de Bogotá, D.C. Edt. Universidad de Los Andes, Jardín Botánico de Bogotá. Bogotá, D.C.

Jones, L. R.M. Instone, K.J. Mee. (2014). Making risk real: urban trees and the ontological politics of risk *Geoforum*, 56 (2014), pp. 211-225.

Klein, R.W. A.K. Koeser, R.J. Hauer, G. Hansen & F.J. Escobedo (2016). Relationship between perceived and actual occupancy rates in urban settings. *Urban For. Urban Green.*, 19 (2016), pp. 194-201.

Klein R W. A. K. Koeser, R. J. Hauer, J. W. Miesbauer, G. Hansen. L. Warner. A. Dale. J. W. Koeser, A.K. & E.T. Smiley (2017). Impact of assessor on tree risk assessment ratings and prescribed mitigation measures. *Urban For. Urban Green.*, 24 (2017), pp. 109-115

Koeser, A.K. R.J. Hauer, R.W. Klein & J.W. Miesbauer (2017). Assessment of likelihood of failure using limited visual, basic, and advanced assessment techniques. *Urban For. Urban Green.*, 24 (2017), pp. 71-79

	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 97 de 98	

Koeser, A.K. E.T. Smiley, R.J. Hauer, B. Kane, R.W. Klein, S.M. Landry M. & Sherwood (2020). Can professionals gauge likelihood of failure? - Insights from Hurricane Matthew. Urban For. Urban Green., 52 (2020). p. 126701.

Konijnendijk CC, Nilsson K, Randrup TB, Schipperijn J. (2005). Urban Forests and Trees. Netherlands: Springer-Verlag.

Pokorny J, O'Brien J, Hauer R, Johnson G, Albers J, Bedker P. (2003). Urban tree risk management: a community guide to program design and implementation. 2003.

Ponce-Donoso, M. y Vallejos-Barra, O. (2016). Valoración de árboles urbanos, comparación de fórmulas. Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cuyo, 48(2), 195-208.

Reyes de la Barra, J., Ponce-Donoso, M., Vallejo-Barra, O., Daniluk-Mosquera, G. y Coelho-Duarte, A.P. (2018). Comparación de cuatro métodos de evaluación visual del riesgo de árboles urbanos. Colombia Forestal, 21(2), 161-173.

Roy, S. Bryne, J. Pickering, C. (2012). A systematic quantitative review of urban tree benefits, costs, and assessment methods across cities in different climatic zones. Urban For. Urban Green. 11(4), 351 – 363.

Schmied A, Pillmann W. Tree protection legislation in European cities. Urban Forestry & Urban Greening. 2003; 2(2):115–24

	MANUAL DE PROCESOS Y PROCEDIMIENTOS				
	GEN – GENERACIÓN DEL COOCIMIENTO				
	Formato: Estructura para la presentación de documentos de investigación				
	Código: GEN.PR.03.F.03	Versión: 3	Fecha: 10/12/2022	Página: 98 de 98	

Tomao, A., Secondi, A., Corona, P., Giularelli, D., Quantrini, V. y Agrimi, M. (2015). Can composite indices explain multidimensionality of tree risk assessment? A case study in an historical monumental complex. *Urban Forest & Urban Greening*, 14(3), 456-465

van Haaften, M. M.P.M. Meuwissen, C. Gardebroek, J. Kopinga (2016). Trends in financial damage related to urban tree failure in the Netherlands. *Urban For. Urban Green.*, 15 (2016), pp. 15-21

van Haaften, M., Liu, Y., Wang, Y., Zhang, Y., Gardebroek, C., Heijman, W., & Meuwissen, M. (2021). Understanding tree failure—A systematic review and meta-analysis. *PloS one*, 16(2). 1 – 23.

Velandia, P., D. Alzate, E. Torres, D. Lara, M Rodriguez, R. Gutiérrez, Y. Martinez, G. Tovar y C. Suarez. (2020). Secretaría de Ambiente de Bogotá, SDA. Modelo de riesgo de volcamiento de árboles en Bogotá.

15. ANEXOS