



**Diseño de rutas óptimas para cuadrillas de poda del arbolado urbano en la
localidad de Suba – Bogotá D.C., mediante el modelo Vehicle Routing Problem
(VRP) en ArcGIS Pro**

Raúl Stiven Siachoque García
Luis Ernesto Espinosa Rodríguez
Mayra Alejandra Barragán Machado
Cristhian Felipe Piñeros Buitrago

Trabajo de grado presentado para optar al título de Especialista en Sistemas de Información
Geográfica

Docente: Alejandro Peláez Arango, Magíster (MSc) en Administración

Asesores de recursos académicos: Juan Pablo Charry Osorio (asesor bibliográfico)

Universidad de Manizales
Facultad de Ciencias e Ingeniería
Especialización en Sistemas de Información Geográfica - Virtual
Manizales, Caldas, Colombia

2026

Cita	(Siachoque García et al., 2026)
Referencia	Siachoque, R., Espinosa, L., Barragán, M., y Piñeros, C. (2026). <i>Diseño de rutas óptimas para cuadrillas de poda del arbolado urbano en la localidad de Suba – Bogotá D.C., mediante el modelo Vehicle Routing Problem (VRP) en Arcgis Pro</i> . [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Manizales. RIDUM: Repositorio Institucional Universidad de Manizales.



Especialización en Sistemas de Información Geográfica - Virtual, III

Declaración de inteligencia artificial: Los autores de este trabajo de grado declaran que han utilizado herramientas de inteligencia artificial (IA), tales como ChatGPT, Gemini, de manera ética y responsable, tal como se establece en el Acuerdo UManizales 002 (julio 26 de 2023) sobre propiedad intelectual e IA. Estas herramientas son empleadas como apoyo en la redacción, revisión gramatical y generación de ideas, pero en ningún caso sustituyen el análisis crítico, la argumentación académica ni la originalidad del trabajo. Asimismo, cualquier contenido generado con asistencia de IA está citado y referenciado adecuadamente, garantizando la integridad académica y el cumplimiento de los principios éticos de la investigación.

Biblioteca y Centro de Recursos: biblioteca.umanizales.edu.co

Repositorio Institucional: ridum.umanizales.edu.co

Universidad de Manizales: umanizales.edu.co

Revistas: revistasum.umanizales.edu.co

Fondo Editorial: editorialum.umanizales.edu.co

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

Dedicatoria

A nuestras familias, por su apoyo incondicional, comprensión y motivación constante a lo largo de este proceso. Su confianza y acompañamiento fueron fundamentales para alcanzar este logro compartido

Agradecimientos

Agradecemos a nuestras familias por su apoyo constante y por ser el principal motor durante este proceso académico. Asimismo, expresamos nuestro reconocimiento a nuestros docentes y asesores, quienes con su conocimiento, orientación y acompañamiento contribuyeron significativamente al desarrollo de este trabajo. Finalmente, agradecemos a todas las personas e instituciones que, de una u otra forma, hicieron posible la culminación de esta investigación.

Tabla de contenido

Resumen	9
Abstract	10
Introducción	11
1. Planteamiento del problema de investigación.....	13
1.1. Lista de problemas	16
2. Antecedentes	20
3. Justificación	22
4. Objetivos.....	25
4.1. Objetivo general	25
4.2. Objetivos específicos.....	25
5. Hipótesis	27
5.1. Hipótesis de trabajo H_1	27
5.2. Hipótesis nula H_0	27
6. Marco teórico	28
6.1. Fundamentos de dendrometría y alometría urbana	28
6.1.1. Variables dasométricas en un inventario forestal.....	28
6.2. Gestión del riesgo y priorización operativa.....	29
6.3. Sistemas de información geográfica (SIG)	29
6.3.1. Componentes de un SIG.....	30
6.4. Teoría de grafos y algoritmos de optimización	31
6.4.1. Algoritmo de Dijkstra.....	32
6.4.2. El Problema de Enrutamiento de Vehículos (VRP).....	32
6.5. Implementación del VRP en ArcGIS Pro	34
6.6. Big Data.....	35

6.7. Arbolado urbano.....	36
7. Metodología.....	37
7.1. Enfoque metodológico	39
7.2. Unidad de análisis, población y muestra.....	40
7.2.1. Población.....	40
7.2.2. Estrategias de muestreo.....	40
7.3. Desarrollo metodológico.....	41
7.3.1. Fase I: Adquisición y preparación de la infraestructura de datos	41
7.3.2. Fase II: Instrumentos empleados.....	41
7.3.3. Fase III: tratamiento y análisis de datos.....	42
8. Resultados.....	44
9. Discusión.....	49
10. Conclusiones.....	51
11. Recomendaciones	52
Referencias.....	53

Lista de tablas

Tabla 1 Matriz de involucrados.....	37
Tabla 2 Matriz de marco lógico	38
Tabla 3. Relación de tiempo y distancia real comparado con el algoritmo VRP	48

Lista de figuras

Figura 1 Árbol de problemas.....	19
Figura 2 Árbol de objetivos.....	26
Figura 3 Representación de entidades de puntos, líneas y polígonos; formato ráster a la izquierda y formato vectorial a la derecha.	31
Figura 4 División por zonas de la localidad de Suba para el inventario del arbolado urbano	46
Figura 5. Cálculos de rutas de acuerdo con el algoritmo VRP.	47

Siglas, acrónimos y abreviaturas

SIG	Sistemas de Información Geográfica
DAP	Diámetro a la Altura del Pecho
RBF	Radial Basis Function
VRP	Vehicle Routing Problem
CARP	Capacited Arc Routing Problem
SIGAU	Sistema de Información para la Gestión del Arbolado Urbano
GDB	Geodatabase

Resumen

La gestión eficiente del arbolado urbano en metrópolis de alta densidad como Bogotá D.C. representa un desafío logístico multidimensional que trasciende la simple jardinería para adentrarse en la ingeniería de operaciones complejas. Este informe de investigación establece los fundamentos teóricos y metodológicos para el desarrollo de un estudio enfocado en la optimización de rutas de poda en la localidad de Suba.

La investigación integra la ciencia de datos espaciales, específicamente el uso del Sistema de Información para la Gestión del Arbolado Urbano (SIGAU), en combinación con los siguientes algoritmos de optimización combinatoria: Problema de Enrutamiento de Vehículos (VRP) y Problema de Enrutamiento de Arcos (CARP).

La metodología adoptó un enfoque cuantitativo y aplicado, orientado a la optimización de rutas mediante la integración de datos geoespaciales del arbolado urbano y la red vial de la localidad de Suba. Se estructuró en tres fases: (i) adquisición y depuración de información proveniente del SIGAU y fuentes cartográficas, (ii) construcción de un modelo de red y parametrización de variables operativas en ArcGIS Pro, y (iii) implementación del modelo Vehicle Routing Problem (VRP) a través de Network Analyst para el diseño de rutas óptimas.

Los resultados evidenciaron mejoras en la eficiencia operativa, reflejadas en la reducción de distancias recorridas y tiempos de desplazamiento en comparación con esquemas tradicionales de planificación. Asimismo, se identificó que la calidad de los datos geoespaciales influye directamente en la precisión del modelo. Aunque no fue posible realizar una validación estadística con rutas reales, el estudio establece una base metodológica sólida y replicable para la gestión del arbolado urbano.

Palabras clave: rutas óptimas, poda, arbolado urbano, modelo Vehicle Routing Problem (VRP)

Abstract

The efficient management of urban trees in high-density metropolises such as Bogotá, D.C., represents a multidimensional logistical challenge that goes beyond simple gardening and enters the realm of complex operations engineering. This research report establishes the theoretical and methodological foundations for the development of a study focused on optimizing pruning routes in the locality of Suba.

The research integrates spatial data science—specifically the use of the Urban Tree Management Information System (SIGAU) with advanced combinatorial optimization algorithms such as the Vehicle Routing Problem (VRP) and the Curve Routing Problem (CARP).

The methodology adopted a quantitative and applied approach, aimed at route optimization through the integration of geospatial data on urban trees and the road network in the town of Suba. It was structured in three phases: (i) acquisition and cleaning of information from SIGAU and cartographic sources, (ii) construction of a network model and parameterization of operational variables in ArcGIS Pro, and (iii) implementation of the Vehicle Routing Problem (VRP) model through Network Analyst for the design of optimal routes.

The results demonstrated improvements in operational efficiency, reflected in reduced travel distances and travel times compared to traditional planning approaches. Furthermore, it was found that the quality of geospatial data directly influences the model's accuracy. Although it was not possible to perform a statistical validation using real routes, the study establishes a solid and replicable methodological foundation for urban tree management.

Keywords: optimal routes, pruning, urban trees, Vehicle Routing Problem (VRP) model

Introducción

El arbolado urbano actualmente se ha convertido en uno de los aspectos de manejo relevantes para las autoridades municipales, pues su mantenimiento y presencia dentro del entorno urbano permiten la regulación del microclima, diseño paisajístico de las ciudades y la disminución de la contaminación al aire. Suba es una de las localidades más extensas de Bogotá D.C. y se caracteriza porque presenta gran cantidad de individuos arbóreos ubicados en el perímetro urbano, los cuales producen beneficios climáticos y económicos. Debido a esta importancia, la gestión adecuada de la infraestructura verde relacionada directamente con el arbolado urbano se convierte en un aspecto vital para mejorar la calidad de vida, la mitigación de cambio climático y la conservación de la biodiversidad (Dwyer, J. F., E. G. McPherson, H. W. Schroeder, & R. A. Rowe., 1992).

Al relacionar la gestión del arbolado urbano en la localidad de Suba, se tienen en cuenta tareas como la poda de mantenimiento y/o seguridad, la cual permite garantizar la protección de la población circundante a los individuos y la generación de accidentes a causa de la caída de ramas e incluso volcamiento de estos por afecciones fitosanitarias probablemente generadas a causa de la ausencia y seguimiento de los individuos. Dichos mantenimientos son ejecutados por personal capacitado con conocimientos específicos en manejo silvicultural, adecuado para cada uno de los individuos, por lo que la movilización de estas cuadrillas especializadas acarrea un sinnúmero de costos asociados y empleo de recursos significativos.

Por lo anterior, la optimización adecuada de rutas para las cuadrillas especializadas en el manejo silvicultural de los individuos arbóreos más llamadas cuadrillas de poda, se convierte en un desafío para las empresas que prestan dichos servicios. Pues con la optimización de estas rutas se busca de manera eficiente disminuir los costos operaciones respecto a los ítems como consumo de combustible, demanda de personal, demanda de bienes o servicio y cumplimiento de objetivos respecto al cumplimiento del plan de podas (Cordeau, J. F., G. Laporte, M. Ropke, M. G. Sevaux, & L. Z. Z. C., 2007).

De tal modo, este trabajo pretende abordar la problemática del manejo adecuado del arbolado urbano respecto a la ejecución del plan de mantenimiento adecuado que permita la disminución de los tiempos de operatividad, disminución de riesgos potenciales como caída de ramas o volcamiento de árboles en el perímetro urbano; abordando dicha problemática con el

empleo de modelos de optimización combinatoria entre Vehicle Routing Problem – VRP y los Sistemas de Información Geográfica (SIG), en este caso el uso de ArcGIS Pro.

1. Planteamiento del problema de investigación

En términos generales, los bosques urbanos, de ahora en adelante “arbolado urbano” mejoran la calidad de vida, siendo esta una percepción globalizada de la población (Van Wassenaeer, Schaeffer, & Kenney, 2000). Según (Hull, 1992) la investigación sobre los bosques urbanos ha aumentado considerablemente en las últimas décadas, lo que ha contribuido a la comprensión, pero ha dejado en evidencia los procesos tradicionales para su gestión. El arbolado urbano es un componente cada vez más importante del entorno en una ciudad, pero debido a una inadecuada gestión, los recursos forestales urbanos han ido disminuyendo, de allí la importancia de conocer el bienestar asociado comprendiendo toda la gama de beneficios producidos por los árboles. Dentro de estos beneficios se destaca el cambio de entorno y procesos físicos y biológicos, conservación de la energía y fijación del CO₂, la calidad del aire, la hidrología urbana, reducción del ruido, entornos deseables, dimensiones sociales, valorización inmobiliaria, entre otras (Dwyer, McPherson, Schroeder, & Rowntree, 1992).

En Bogotá, el arbolado urbano ha tenido especial importancia debido a su impacto en la renovación urbana del distrito capital, el cual tiene establecido un orden institucional, jurídico y técnico para su manejo y gestión desde el año 1988, con lo cual se justifican sus beneficios tales como control de la contaminación, regulador del clima, protección contra el viento, control de erosión y estabilización de taludes, protección de cuencas, paisaje, recreación, aporte cultural, nicho y hábitat (Tovar, 2006). Es importante realizar la evaluación y monitoreo en periodos de tiempo para determinar el crecimiento del arbolado urbano el cual es el aumento en diámetro y altura de cada árbol, y así cuantificar los beneficios anteriormente mencionados e identificar a tiempo los riesgos y problemas que puedan presentar los individuos. (Palacio, 2020).

El uso de herramientas como Network Analyst y ArcGIS Pro, permite optimizar el uso de rutas en distintos ámbitos y contextos, permitiendo reducir el tiempo para la toma de decisiones e incrementando la capacidad de ejecución de actividades que garanticen la realización de tareas de manera adecuada en el tiempo preciso sin pérdidas para las empresas y con la garantía del cumplimiento de los objetivos. Es así como (Israel D. Herrera Granda, Jaime Cadena Echeverría, Juan C. León Jácome, Erick P. Herrera Granda, Danilo Chavez Garcia y Andres Rosales, 2024),

mediante el estudio *A Heuristic Procedure for Improving the Routing of Urban Waste Collection Vehicles Using ArcGIS*, propone un procedimiento heurístico para mejorar las rutas de recolección obtenidas con el software ArcGIS y su complemento Network Analyst; donde a través de una serie de experimentos, se detectó que el software presento diversas inconsistencias con los conceptos de gestión logística y operativa, como la realización innecesaria de giros en U en un callejón sin salida y el acceso innecesario a zonas de difícil acceso para un solo cliente por esta razón, planificar las rutas de recolección debe considerar para tomar una buena decisión que considere el costo de visitar zonas de difícil acceso y los beneficios de llegar a ellas; proponiendo un procedimiento heurístico sistemático para reducir el número de giros en U que realiza un camión de recolección de residuos municipales.

Para ello, utilizamos el complemento ArcGIS-Network Analyst para reducir el número de subrecorridos en la ruta, aplicando el enfoque del Problema de Ruteo de Arco Capacitado Dirigido, obteniendo como resultado que se logra reducir la distancia total recorrida por la flota vehicular, se aumenta la cobertura de aceras que el camión utiliza en el perímetro urbano de una ciudad y se minimiza el tiempo empleado en las operaciones de recolección de residuos sólidos urbanos por lo que la importancia del trabajo permitió la gestión eficaz de RSU es un servicio municipal esencial, cuya regulación puede impulsar la innovación, la sostenibilidad y la eficiencia en el sector.

Por otro lado, (Quendi, 2022) mediante el estudio *Diseño de una ruta de recolección para optimizar el servicio de recolección de residuos sólidos por contenedores del GAD Municipal de Tulcán* con base en mecanismos de resolución de problemas VRP, implemento el uso de herramientas como ArcGIS-Network Analyst para la optimización de rutas de recolección de residuos en la ciudad de Tulcán, diseñando rutas eficientes para la prestación del servicio, y planteando acciones como la instalación de contenedores de acuerdo a la demanda de residuos generados en la zona de estudio.

(Arias Londoño, A., Hincapié Isaza, R. A., & Granada Echeverri, M., 2015), en su estudio de *Programación óptima del mantenimiento de la vegetación bajo redes aéreas de distribución* usando una técnica de optimización multiobjetivo, busca minimizar la interrupción del servicio de energía eléctrica por causa de la vegetación que entra en contacto con los cables conductores y generan fallo, así mismo, optimizar el costo de los mantenimientos por medio de la planificación de rutas eficientes que permitan intervenir la vegetación que verdaderamente puede llegar a generar

dichas interrupciones. En este estudio presentan dos modelos uno que minimiza el impacto negativo de la vegetación y otro minimiza los costos de las podas, y el uso de Network Analyst y ArcGIS Pro contribuye al análisis de la información, identificación de aspectos potencial y generación de rutas que optimicen el trabajo y garanticen la eficiencia en el servicio de energía.

Por lo anterior, el enfoque de este estudio es el diseño de rutas optimas que permitan gestionar de manera eficiente el arbolado urbano presente en la localidad de Suba – Bogotá D.C, integrando el modelo Vehicle Routing Problem (VRP) en ArcGIS Pro, con base integrando los datos recolectados en campo con herramientas de un sistema de información geográfica, las cuales pueden llegar a presentar algunas dificultades como la calidad y disponibilidad de datos traducido en la calidad de las imágenes de satélite (Wulder & Franklin, 2007) y su complejidad.

De otro modo, la planificación urbana en la actualidad se han convertido en verdaderos temas importante para la gestión gubernamental y planificación ciudadana, debido a que han pasado de ser plantados ornamentalmente a convertirse en infraestructura de las áreas por lo que su adecuado mantenimiento permite la convivencia y el equilibrio entre la naturaleza y el desarrollo poblacional; para el caso de Suba, la cual es una localidad extensa, la presencia de individuos arbóreos en la zona urbana se ha convertido climático que contribuye a la regulación del microclima, sobre todo contribuye a combatir la contaminación del aire que ha venido en aumento gracias al aumento de los vehículos, empresas, multinacionales y expansión poblacional, secuestro de carbono y como refugio y hábitats para la biodiversidad urbana.

Sin embargo, la presencia de estos individuos arbóreos dentro de la localidad de suba, es decir, dentro de área urbana puede llegar a generar conflictos con las vías, edificaciones o redes eléctricas, por lo que plantear rutas optimas de intervención para poda y mantenimiento de los mismos, es clave para minimizar los riesgos que se pueden presentar como afectación a la población por caída de ramas, o a infraestructura o vehículos, alteración a la seguridad pública porque al presentarse caída de ramas o caída de la estructura (fuste) de un árbol hacia infraestructura eléctrica no solo puede interferir en el corte del fluido eléctrico, sino generar arcos eléctricos que pueden dañar los bienes de las propiedades aledañas hasta causar la muerte.

Por tanto, el mantenimiento preventivo de los individuos arbóreos ubicados en área urbanos se ha convertido para los gobiernos en una actividad regulada y de obligación y ejecución continúa basada en la seguridad y salud pública regulada estrictamente por la normativa distrital.

Históricamente, en la localidad de Suba – Bogotá D.C, la intervención de los individuos arbóreos ubicados en las áreas urbanas se ha basado en la intervención de aquellos que se encuentran dentro del SIGAU – (Sistema de Información para la Gestión del Arbolado Urbano), el cual cuenta con un censo georreferenciado que incluye especie, altura, DAP y estado físico de más de 1.65 millones de individuos, es posible transitar de un modelo reactivo a uno predictivo y optimizado.

Por todo esto, es que la realización de este estudio, permite generar la optimización de los datos del SIGAU y la red vial de la localidad de Suba – Bogotá D.C, maximizando la cantidad de individuos intervenidos y reduciendo la aparición de los riesgos mencionados anteriormente, los costos operativos y disminuyendo las emisiones de gases de efecto invernadero por el uso frecuente de vehículos, aún más teniendo en cuenta que la localidad objeto de estudio presenta una topografía que varía desde los humedales planos de Tibabuyes hasta las pendientes pronunciadas de los Cerros de Suba, pues la falta de optimización de rutas basada en restricciones geográficas y operativas aumenta los costos y la huella de carbono de la flota de mantenimiento.

Teniendo en cuenta la necesidad de visitar árboles específicos dispersos y/o cubrir tramos completos de vías, respetando cada uno de los contextos en los que se desarrolló la vida urbana de la localidad como: horarios escolares, restricciones de tráfico y capacidades de carga de biomasa, y la necesidad de implementar estrategias sostenibles para la gestión del arbolado urbano enfocado al crecimiento arbóreo, se pretende responder al interrogante ¿Cómo diseñar rutas optimas de poda para el manejo adecuado del arbolado urbano a través de la integración de sistemas de información geográfica, variables dasométricas, infraestructura vial y la optimización de datos que permitan mejorar la toma de decisiones en la gestión del arbolado urbano presente en la localidad de Suba – Bogotá?

1.1. Lista de problemas

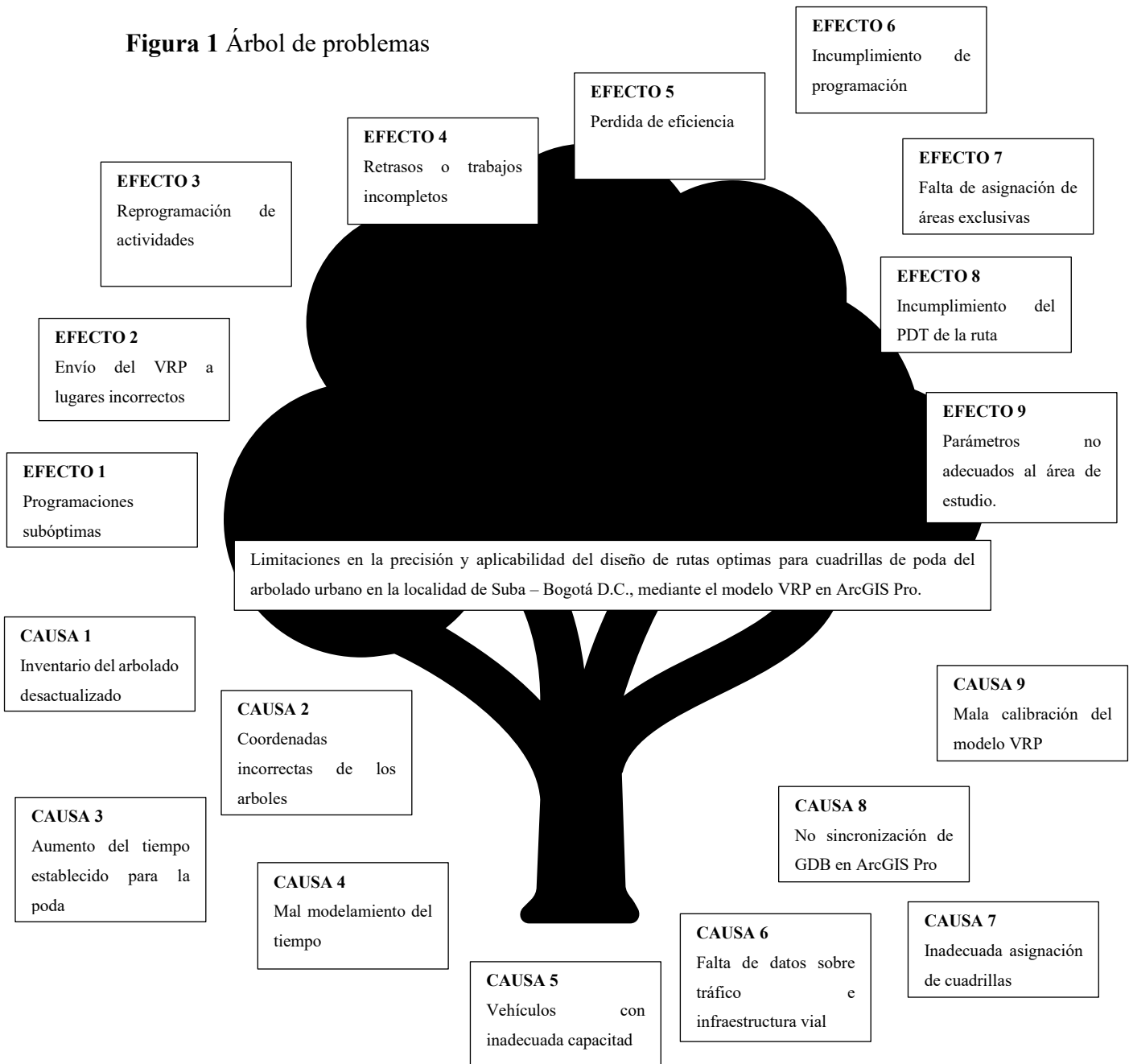
El diseño de rutas óptimas para cuadrillas de poda del arbolado urbano en la localidad de Suba – Bogotá D.C., mediante el uso del modelo Vehicle Routing Problem (VRP) en Arcgis Pro, el uso de sistemas de información geográfica (SIG) y análisis de grandes volúmenes de datos en la

localidad de Suba – Bogotá D.C. presenta múltiples limitaciones técnicas y metodológicas que es necesario considerar para garantizar la aplicabilidad de los resultados:

- Limitaciones computacionales: El procesamiento de grandes volúmenes de datos espaciales y ambientales pueden requerir recursos computacionales avanzados (Goodchild, 2007).
- Dificultad para incorporar datos socioeconómicos: Factores como la actividad humana o políticas de manejo forestal son difíciles de integrar en modelos basados en SIG (Nagendra, 2001).
- Complejidad combinatoria del enrutamiento urbano: El diseño de rutas para poda puede verse afectado en la optimización a partir de la disponibilidad de vehículos que puedan atender la demanda de intervenciones a menor costo y con restricciones de optimización como efectividad, tiempo, ventanas de servicio y ubicación (JUAN JESÚS BERNAL GARCÍA, ELOY HONTORIA HERNÁNDEZ y DARKO ALEKSOVSKI, 2013).
- Dificultad del diseño o modelado de datos por estar incompletos: La falta de información geoespacial de los individuos arbóreos ubicados en el área urbana como coordenadas y estado fitosanitario, afectaría la definición de tiempos en la necesidad de la ejecución de la poda y lugar donde se encuentra establecido el mismo, por lo que dificulta el diseño del modelo (Camilo Ordóñez Barona, Tahia Devisscher, Cynnamon Dobbs, Luis Orozco Aguilar, Mariana Dias Baptista, Nuria Mónica Navarro, Demóstenes Ferreira da Silva Filho, Francisco J. Escobedo, 2020).
- Múltiples Variantes del VRP: Teniendo en cuenta que para la poda urbana se pueden presentar diferentes variantes del VRP, esto podría llegar a generar un problema entre el cumplimiento de la ejecución y efectividad de la realización de la actividad, así como de la llegada de la cuadrilla al lugar de intervención (Toro O., E. M., Escobar Z., A. H., y Granada E., M. , 2016)).
- Equidad de rutas y cargas: generar equidad de rutas entre las cuadrillas a partir de VRP puede dificultar la asignación de trabajos y su efectivo cumplimiento
- Restricciones de entornos urbanos: las restricciones de los entornos urbanos están asociado al ámbito social y ambiental, que busca llevar a cabo un adecuado manejo entre la realización de actividades y el tránsito, los peatones y las redes eléctricas (Camilo Ordóñez Barona, Tahia Devisscher, Cynnamon Dobbs, Luis Orozco Aguilar, Mariana Dias Baptista, Nuria Mónica

Navarro, Demóstenes Ferreira da Silva Filho, Francisco J. Escobedo, Urban Forestry and Urban Greening).

- Complejidad computacional y necesidad de heurísticas: el uso de VRP y sus extensiones pueden presentar errores en el cálculo de los algoritmos en la organización de los nodos para la optimización de las rutas (Toro O., E. M., Escobar Z., A. H., y Granada E., M. , 2016).
- Combinación con otros sistemas urbanos: En la búsqueda de la optimización de las rutas, se debe plantear la minimización de distancias urbanas que garantice la gestión adecuada de residuos, respecto a la programación de las cuadrillas y los picos de tráfico pues estos dificultan u optimizan el cumplimiento de objetivos (Camilo Ordóñez Barona, Tahia Devisscher, Cynnamon Dobbs, Luis Orozco Aguilar, Mariana Dias Baptista, Nuria Mónica Navarro, Demóstenes Ferreira da Silva Filho, Francisco J. Escobedo, Urban Forestry and Urban Greening).

Figura 1 Árbol de problemas

2. Antecedentes

La optimización de rutas para las cuadrillas de poda del arbolado urbano empleando el modelo Vehicle Routing Problem – VRP en ArcGIS Pro, permite generar estrategias que permitan una planificación urbana adecuada y gestión optima de la logística para la ejecución de planes de trabajo asociadas la gestión adecuada del arbolado urbano y minimización de riesgos.

El arbolado urbano está sometido a distintos cambios por lo que el desafío principal gira en torno a entender como cambian en un periodo de tiempo bajo una serie de condiciones naturales y antrópicas, es así como los modelos de crecimiento son de vital importancia para identificar estos cambios, según (Tesch, 1980) los modelos de crecimiento de bosques se han convertido en una rama importante de investigación en las ciencias forestales, de los cuales el primer registro de mediciones de crecimiento arbóreo, según (Salas, Gregoire, Craven, & Gilabert, 2016) son atribuidos a Teofrasto (370-285 A.C.). Así mismo, se indica que los modelos de crecimiento de bosques han evolucionado desde simples tablas a modelos que predicen variables como el área basal, altura y volumen.

A nivel global, el uso del modelo Vehicle Routing Problem – VRP y los Sistemas de Información Geográfica – SIG en los servicios públicos, han sido de vital importancia para la gestión y optimización de costos operativos y tiempos de respuesta (Dantzig, G. B., & Ramser, J. H., 1959), para el caso de los servicios públicos al requerirse la recolección en puntos dispersos es de vital importancia el cumplimiento de los tiempos de ejecución (Toth, P., & Vigo, D. (Eds.), 2002).

De otro modo, la implementación e integración de los SIG en el uso de modelos matemáticos ha potenciado el desarrollo y la solución de problemas desde un ámbito geoespacial a gran escala, es decir, ha permitido abarcar y comparar los datos de cierta cantidad de tiempo y la finalidad de los mismos en pro de la mejora continua; plataformas como Network Analyst en ArcGIS Pro, no solo ha permitido abarcar información a gran escala sino que ha permitido estructurar según el fin de cada problema datos para atributos como la direccionalidad, restricciones de movilidad y tiempo de recorrido. En este contexto, se hace relevante mencionar a (Current, J., Pirkul, H., & Sweeney, D., 1990) quienes destacaron que los SIG permiten el análisis de las restricciones espaciales del modelo VRP y la manipulación visual de los datos en plataformas geoespaciales, acción relevante para la gestión del arbolado urbano municipal.

A nivel latinoamericano, el uso de ArcGIS Pro y Network Analyst ha contribuido a la optimización de rutas, principalmente aquellas rutas encargadas de prestar servicios urbanos como gestión de residuos sólidos, donde las mismas han permitido la optimización de rutas que permitan la reducción significativa de las distancias recorridas validando la factibilidad técnica (Sarmah, 2019), del mismo modo el uso de este modelo en la herramienta de ArcGIS Pro se implementó para el transporte público en la ciudad de Medellín generando aumento en la eficiencia operativa, reducción de costos y aumento en las ganancias (Restrepo-Botero, 2017).

De igual manera, en Colombia las entidades públicas han implementado los sistemas de información geográfica - SIG para la gestión de la vegetación por medio de la creación del SIG para la Gestión del Arbolado Urbano – SIGAU en la que se cuenta con un censo total o inventario de los individuos arbóreos de Bogotá D.C, los cuales se convierten en insumo de base de datos geoespacial de alta calidad para la planificación adecuada de la vegetación en los entornos urbanos (Bogotá., 2020).

Sin embargo, a pesar de la existencia de un inventario georreferenciado, la logística de las cuadrillas de poda a nivel distrital enfrenta retos de ineficiencia por el crecimiento exponencial de las demandas de servicio. Por tal razón, se genera la necesidad de la implementación de herramienta para la optimización de rutas por medio del modelo VRP para las cuadrillas de poda, donde se mejora la productividad y el tiempo de respuesta ante la necesidad del manejo de los individuos arbóreos.

3. Justificación

El actual crecimiento y desarrollo urbano en las ciudades ha generado disminución en la calidad del aire y disminución en la biodiversidad afectando directamente el equilibrio de ecosistema, por tal razón la gestión adecuada de los recursos naturales en las ciudades se convierte en un factor clave; la presencia del arbolado urbano en las ciudades contribuye a mejorar la calidad del aire, regula térmicamente la temperatura y contribuye a la conservación de la biodiversidad (Otaya Burbano, Sánhez Zapata, Morales Soto, & Botero Fernández, 2006), por lo anterior su crecimiento y adecuada gestión permite contribuir de manera positiva al desarrollo sostenible en las ciudades.

Desde el enfoque de los SIG, las herramientas existentes no permiten realizar un manejo de la vegetación arbórea de las ciudades o arbolado urbano, así como la falta de modelos precisos que permitan diseñar rutas óptimas para el manejo adecuado del arbolado urbano, por lo que se dificulta una gestión y planificación eficiente de los espacios verdes en las ciudades y su debida conservación. Actualmente, en las ciudades la gestión y manejo del arbolado urbano existente, depende de la ejecución de métodos tradicionales como lo son la realización de inventarios forestales manuales y la evaluación fitosanitaria periódica (Reitberger, Kooniyara, Parhizgar, Roetzer, & Lang, 2025).

Desde el enfoque ambiental, un adecuado manejo del arbolado urbano contribuirá a la mitigación del efecto “islas de calor”, reducción en la contaminación atmosférica y conservación de los ecosistemas urbanos (David J. Nowak, 2017) con esto permitiéndole a la biodiversidad tener lugares donde habitar, además de la creación de políticas públicas que permitan optimizar recursos y garantizar la sostenibilidad en el tiempo (Santiago-García, 2020). En consecuencia de lo anterior, el adecuado manejo de la vegetación arbórea en las ciudades cumple un papel fundamental en el desarrollo sostenible de la misma, es por esto que la presente investigación permitirá aportar conocimiento fundamental para el diseño de políticas públicas basadas en la gestión del arbolado en ciudades en expansión, y el diseño de rutas optimas e integración de modelos Vehicle Routing Problem (VRP) en Arcgis Pro permitirá a las autoridades locales anticipar su desarrollo urbano con el objetivo de diseñar estrategias de gestión sostenibles y optimizar el manejo del arbolado urbano.

De ahí que, en Bogotá, especialmente en la localidad de Suba, la urbanización acelerada ha traído grandes desafíos ambientales, por ende, es fundamental encontrar soluciones innovadoras como lo es el uso de tecnologías como los SIG, que permitan gestionar mejor las áreas verdes y

planificar su expansión; siendo esto relevante como consecuencia de la necesidad de plantear estrategias de adaptación y mitigación de los efectos del cambio climático. Aún más teniendo en cuenta que actualmente la localidad de Suba – Bogotá D.C, es una de las zonas más densamente pobladas de la ciudad, por lo cual se enfrenta un problema serio como lo es la falta de espacios verdes y la reducción de la cobertura arbórea el cual se ha generado a causa del crecimiento de la población y la infraestructura; trayendo consigo la fragmentación de los ecosistemas urbanos y la pérdida de biodiversidad (CONPES 3918, 2018), siendo indispensable para esta localidad diseñar estrategias que permitan proteger y aumentar las zonas arboladas.

Ahora bien, expandir la cobertura contribuye directamente a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en especial aquellos relacionados con la acción climática, la protección de los ecosistemas y el desarrollo de ciudades más sostenibles (ONU, 2015). Con herramientas como ArcGIS, se pueden analizar el arbolado urbano desde una perspectiva integral, considerando variables como la disponibilidad de espacio, la calidad del suelo, el clima y las necesidades ecológicas del área (ESRI, 2021).

Más allá del impacto ambiental, tener más árboles en la ciudad mejora la calidad de vida de las personas, fomentan la convivencia, promueven la actividad física y ayudan a reducir el estrés (Wolch, J.R., Byrne, J., & Newell, J.P, 2014). Acciones importantes en una ciudad como Bogotá, donde el tráfico y la contaminación son problemas diarios. Contar con más árboles no es un lujo, si no una necesidad.

Simultáneamente, una gestión adecuada del arbolado urbano permitirá la reducción de los costos a la salud pública respecto a la disminución de enfermedades respiratorias derivadas de la contaminación del aire (Kardan, O., Gozdyra, P., Misic, B., et al., 2015). En consecuencia, tener más árboles en las calles y parques se convierte en un factor clave y justificable para la ejecución del presente estudio, el cual contribuirá a disminuir los gastos derivados de un mal manejo del arbolado urbano, el aumento en el valor de la infraestructura y contribuye al desarrollo económico de las zonas en las que se implementan programas de reforestación y mantenimiento adecuado (Escobedo, f.j, Kroeger, T., & Wagner, J.E, 2011)

Ante estas problemáticas, el presente estudio busca diseñar rutas óptimas para cuadrillas de poda del arbolado urbano, mediante el modelo Vehicle Routing Problem (VRP) en Arcgis Pro, con el fin de mejorar la planificación y conservación del arbolado urbano en la localidad de Suba, Bogotá D.C. Esta investigación busca contribuir en el adecuado manejo de los entornos urbanos,

teniendo en cuenta que la literatura se ha enmarcado en la generación de modelos principalmente para rutas de manejo y gestión de residuos sólidos. Por tal razón, la propuesta de usar modelos VRP con ArcGIS Pro, donde se tengan en cuenta patrones espaciales y temporales, así como la integración de datos geoespaciales y análisis predictivo permitirá mejorar el diseño y la precisión de las rutas optimas con el fin de generar información útil para la gestión del arbolado en espacios urbanos. Además, de optimizar recursos y contribuir a la toma de decisiones de planificación adecuadas como lo es la aplicación de técnicas de poda, mantenimiento del arbolado, tala de individuos fitosanitariamente afectados o resiembra de existentes.

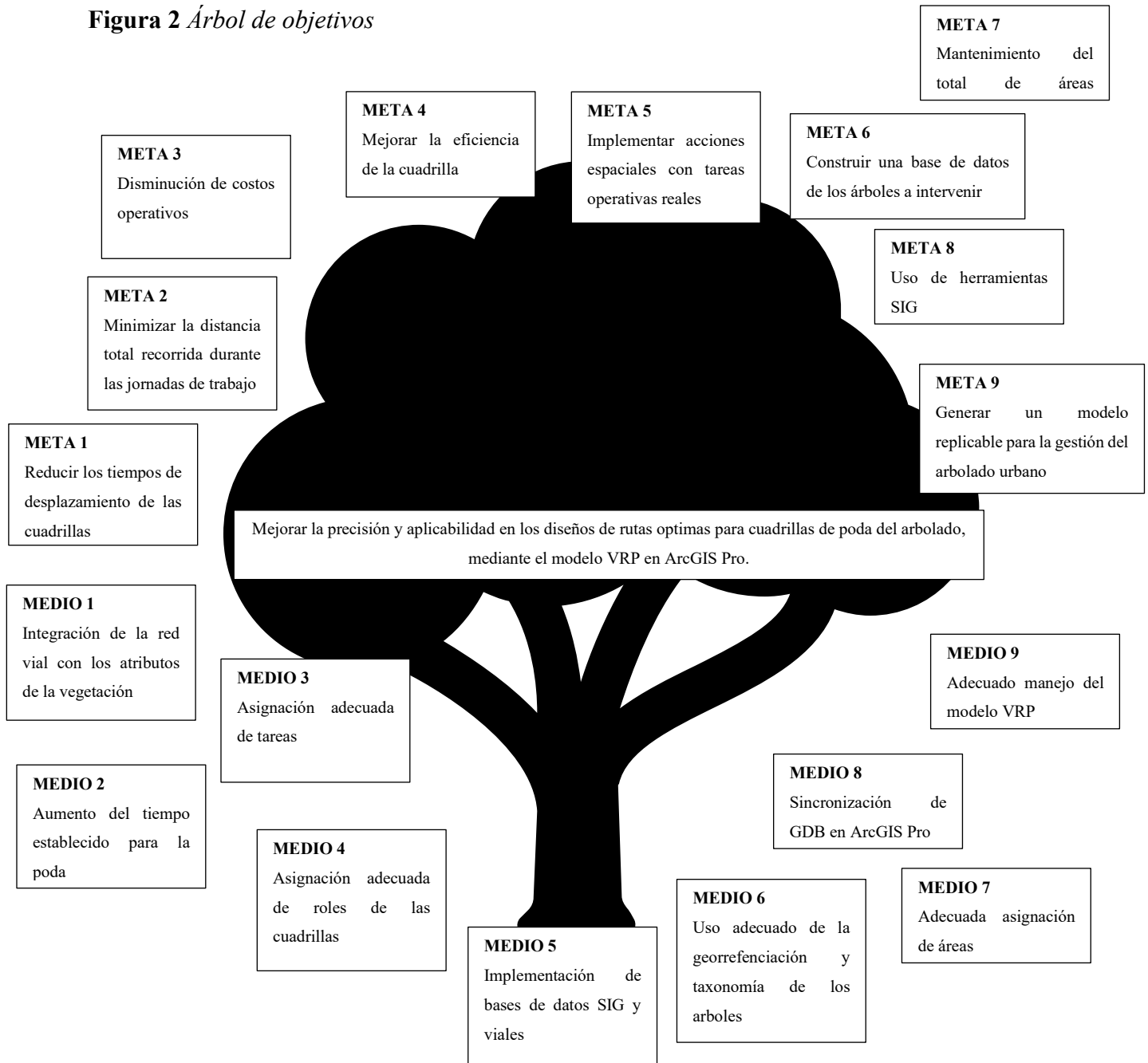
4. Objetivos

4.1. Objetivo general

Diseñar rutas óptimas para cuadrillas de poda del arbolado urbano en la localidad de Suba – Bogotá D.C., utilizando herramientas de sistemas de información geográfica (SIG) mediante el modelo Vehicle Routing Problem (VRP) en ArcGIS Pro.

4.2. Objetivos específicos

- Analizar el estado del arte y metodologías existentes en la aplicación del modelo VRP en ArcGIS Pro.
- Recolectar, procesar y consolidar datos tanto del inventario forestal del SIGAU como de la red de infraestructura vial para la localidad de Suba en la ciudad de Bogotá D.C.
- Seleccionar y adaptar técnicas de modelado que integran ArcGIS Pro para diseñar rutas óptimas para cuadrillas de poda del arbolado urbano en la localidad de Suba. Bogotá D.C.
- Proponer rutas para la toma de decisiones en la planificación y mantenimiento del arbolado urbano, basadas en los resultados obtenidos del modelo.

Figura 2 *Árbol de objetivos*

5. Hipótesis

5.1. Hipótesis de trabajo H_1

La integración de variables dasométricas, redes viales con datos satelitales mediante el uso de un modelo Vehicle Routing Problem (VRP) en ArcGIS Pro para el diseño de rutas óptimas para cuadrillas de poda del arbolado urbano en la localidad de Suba – Bogotá D.C., utilizando herramientas de sistemas de información geográfica (SIG), mejora significativamente los rendimientos de la precisión y efectividad en los rendimientos de la actividad de poda.

5.2. Hipótesis nula H_0

La integración de variables dasométricas, redes viales con datos satelitales mediante el uso de un modelo Vehicle Routing Problem (VRP) en ArcGIS Pro para el diseño de rutas óptimas para cuadrillas de poda del arbolado urbano en la localidad de Suba – Bogotá D.C., utilizando herramientas de sistemas de información geográfica (SIG), no mejora significativamente los rendimientos de la precisión y efectividad en los rendimientos de la actividad de poda.

6. Marco teórico

6.1. Fundamentos de dendrometría y alometría urbana

Para optimizar una ruta de poda, es imperativo cuantificar primero la "demanda" en cada nodo. En logística tradicional, la demanda es una caja o un paquete de peso conocido; en silvicultura urbana, la demanda es un servicio (poda) cuya duración y complejidad dependen de las características biométricas del árbol.

6.1.1. Variables dasométricas en un inventario forestal

El Sistema de Información para la Gestión del Arbolado Urbano (SIGAU), administrado por el Jardín Botánico de Bogotá, es la fuente de datos primaria. Para efectos de modelación logística, las variables críticas que definen la función de costo de servicio en cada nodo son:

- **Diámetro a la altura del pecho (DAP):** Medido a 1.3 metros del suelo, el DAP es el predictor más robusto de la dimensión total del árbol. Existe una correlación alométrica directa entre el DAP y el volumen de biomasa aérea, lo cual permite inferir la cantidad de residuos vegetales que se generarán tras una poda y, consecuentemente, el tiempo de chipeado y carga. (Dapsopoulou & Zianis, 2025).
- **Altura total y altura de copa:** Estas variables determinan la necesidad de equipos especializados. Árboles con alturas superiores a 15 metros en entornos urbanos densos requieren el despliegue de camiones canasta o técnicas de trepa especializada, lo que incrementa significativamente el tiempo de preparación en el nodo antes de iniciar el corte efectivo. (Vera, Rodrigues, Barúa, Bonnin, & da Silva, 2020)
- **Volumen de copa y biomasa:** La poda implica la remoción de una porción de la copa viva (generalmente no más del 25-30% para evitar estrés fisiológico). La estimación del volumen de copa es fundamental para predecir el volumen de residuos. Modelos geométricos aplicados a los datos permiten calcular este volumen y, mediante factores de expansión de biomasa, estimar la carga para el vehículo. (Kurdi, Fayez; Lewandowicz, Elzbieta; Gharineiat, Zahra; Shan, Jie, 2024)

6.2. Gestión del riesgo y priorización operativa

En la gestión de residuos sólidos, la prioridad es uniforme: todos los residuos deben ser recogidos. En la silvicultura urbana, la prioridad es jerárquica y está dictada por el riesgo. El marco teórico adopta la metodología de evaluación de riesgo de la Sociedad Internacional de Arboricultura (ISA) como el estándar para definir la "ventana de tiempo" y la "penalización por retraso" en el algoritmo de ruteo. La metodología TRAQ (Tree Risk Assessment Qualification) descompone el riesgo en la probabilidad de fallo y la consecuencia del impacto. Para el modelo de optimización, esto se traduce en categorías de atención que alimentan las restricciones del algoritmo:

Nivel de riesgo (TRAQ)	Características físicas	Prioridad en el ruteo	Restricción algorítmica (VRP)
Emergencia / Inminente	Inclinación >40°, levantamiento de raíces, grietas transversales en fuste, colapso parcial.	Critica (P1)	Ventana de tiempo estricta ($T < 24h$). Debe ser el primer nodo o nodos de la ruta.
Alto	Pudrición avanzada en base, ramas >5cm muertas sobre blancos constantes (vías, andenes).	Alta (P2)	Ventana de tiempo corta (ej. < 7 días). Alta penalización en la función objetivo si se retrasa.
Moderado	Interferencias menores con redes, ramas bajas obstaculizando paso peatonal, densidad de copa excesiva.	Media (P3)	Ventana de tiempo flexible. Se agrupa por proximidad espacial para eficiencia.
Bajo	Poda de formación, mantenimiento estético, despeje de luminarias sin riesgo eléctrico inmediato.	Baja (P4)	Relleno de ruta ("Backlog"). Se atiende si la ruta pasa cerca y hay capacidad sobrante.

Esta priorización transforma el problema de ruteo clásico. El modelo teórico debe favorecer la visita a nodos de alta prioridad incluso si esto implica desviaciones geográficas que aumentan la distancia total recorrida, reflejando el valor social de prevenir accidentes fatales o daños a la infraestructura.

6.3. Sistemas de información geográfica (SIG)

Los SIG son herramientas computacionales diseñadas para capturas, almacenar, consultar, analizar y visualizar datos geoespaciales. Se basan en la integración de hardware, software y metodologías que permiten la manipulación de información georreferenciada, es decir, datos asociados a ubicaciones específicas en la superficie terrestre (Longley, 2015).

Desde su origen en los años 60, los SIG han evolucionado para convertirse en tecnologías esenciales en la gestión del territorio, el análisis de recursos naturales y la planificación urbana (Kang-Tsung-Chang, 2019). Los SIG integran diversas disciplinas, como la cartografía, la teledetección, la geodesia y la estadística espacial. La principal característica que distingue a los SIG de otros sistemas de información es su capacidad para manejar datos espaciales, lo que permite la integración de múltiples capas de información georreferenciada para la toma de decisiones informadas.

Los SIG incorporan operaciones geométricas y topológicas para el análisis de relaciones espaciales, como proximidad, conectividad y superposición de elementos geográficos. Además, emplean métodos de interpolación y modelado estadístico para predecir valores desconocidos a partir de datos observados. Esto permite la creación de modelos espaciales avanzados que pueden incluir simulaciones dinámicas y análisis de series temporales (Kang-Tsung-Chang, 2019).

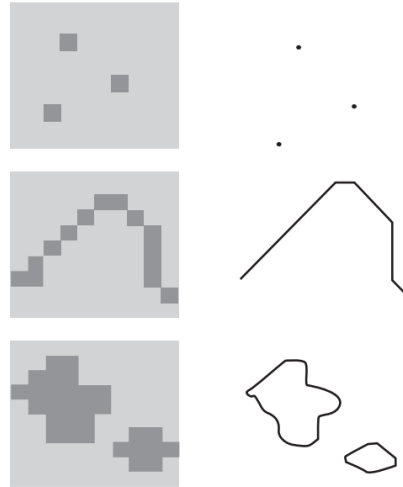
6.3.1. Componentes de un SIG

Un SIG está compuesto por varios elementos fundamentales que permiten su funcionamiento eficiente. Estos componentes incluyen hardware, software, datos geoespaciales, usuarios y procesos organizacionales (Kang-Tsung-Chang, 2019).

- **Hardware:** El hardware de un SIG incluye los dispositivos físicos necesarios para la ejecución de las tareas del sistema, estos incluyen computadoras y servidores para el procesamiento y almacenamiento de grandes volúmenes de datos, dispositivos de entrada y salida para la adquisición de datos geoespaciales y por último impresoras y plotters utilizados para la producción de mapas en formato físico.
- **Software:** El software de un SIG es el conjunto de programas y herramientas que permiten la manipulación y análisis de datos espaciales. Existen dos tipos de software SIG en los que podemos encontrar software propietario como ArcGIS de ESRI y software de código abierto como QGIS.
- **Datos geoespaciales:** Los datos utilizados en un SIG pueden clasificarse en datos vectoriales y datos ráster. Los datos vectoriales son representados mediante puntos, líneas y polígonos los cuales son ideales para describir objetos discretos como calles o ríos. Por otro lado, los datos

ráster son compuestos por una matriz de celdas o píxeles y son usados para representar fenómenos continuos como temperatura o cobertura del suelo.

Figura 3 Representación de entidades de puntos, líneas y polígonos; formato ráster a la izquierda y formato vectorial a la derecha.



Nota. Fuente (Kang-Tsung-Chang, 2019)

6.4. Teoría de grafos y algoritmos de optimización

El corazón computacional de la propuesta reside en la modelación matemática de la red vial y la operación logística. Se integran conceptos de la teoría de grafos con algoritmos de optimización combinatoria. La infraestructura vial de la localidad de Suba se modela como un grafo dirigido $G = (V, A)$, donde:

- V (vértices / nodos): El conjunto de puntos de interés. Incluye el depósito (punto de partida de las cuadrillas), los sitios de disposición final y los árboles a intervenir (puntos de demanda).
- A (arcos / aristas): Representan los segmentos de vía que conectan los nodos. Dado que las vías urbanas tienen sentido de circulación y restricciones de giro, el grafo debe ser dirigido.

Cada arco (i, j) tiene asociado un peso o costo C_{ij} , que representa la "impedancia" para transitar de i a j . En el contexto de la congestión vehicular de Bogotá, la distancia euclidiana o métrica es un indicador pobre del costo real. El marco teórico propone el tiempo de viaje como la impedancia principal:

$$C_{ij} = f(\text{Longitud}_{ij}, \text{Velocidad_Promedio}_{ij}, \text{Congestión}_t)$$

Donde la velocidad promedio depende de la jerarquía vial (arterial, colectora, local) y la congestión es un factor dependiente de la hora del día (t). Esto justifica el uso de APIs de tráfico en tiempo real o datos históricos de velocidad para ponderar el grafo dinámicamente.

6.4.1. Algoritmo de Dijkstra

El algoritmo de Dijkstra es la herramienta fundamental para calcular la matriz de costos origen-destino que alimenta al modelo de ruteo superior. Su función es encontrar el camino más corto o rápido entre dos puntos específicos en el grafo. La lógica del algoritmo se describe de tal modo:

- **Inicialización:** Asigna un valor de distancia tentativo de cero al nodo inicial y de infinito a todos los demás. Marca todos los nodos como no visitados.
- **Exploración voraz (Greedy):** Selecciona el nodo no visitado con la menor distancia tentativa acumulada.
- **Relajación:** Para el nodo actual, considera todos sus vecinos no visitados y calcula su distancia tentativa a través del nodo actual. Si esta nueva distancia es menor que la registrada previamente, se actualiza el valor (se "relaja" la arista).
- **Iteración:** Marca el nodo actual como visitado y repite el proceso hasta que el nodo destino haya sido visitado o la distancia mínima a todos los nodos sea definitiva.

Es crucial entender que Dijkstra, por sí solo, no resuelve el problema de ruteo de vehículos (VRP). Dijkstra encuentra la mejor ruta de A a B. No decide el orden óptimo para visitar A, B, C, D... N. Por ello, en este trabajo, Dijkstra se utiliza como el sub-algoritmo que calcula los costos reales de viaje entre cada par de árboles, generando la matriz de costos que luego es procesada por heurísticas de VRP.

6.4.2. El Problema de Enrutamiento de Vehículos (VRP)

El Problema de Enrutamiento de Vehículos (VRP), es un método aplicativo que integra rutas óptimas para vehículos y da solución a la investigación de operaciones los cuales buscan atender un conjunto de acciones con el fin de minimizar un costo total de las operaciones y las diversas restricciones (Dantzig, 1959).

El VRP, también permite incorporar restricciones reales para la optimización de rutas una vez se tengan datos como capacidad de los vehículos, redes y rutas viales, horarios de atención y múltiples depósitos (Laporte, 2009).

Respecto al arbolado urbano, desde el modelo VRP permite la representación de variantes como la capacidad, ventanas de tiempo y múltiples depósitos; permitiendo representar de manera más realista las condiciones bajo las cuales se desarrolla el mantenimiento del arbolado urbano.

La operación de poda corresponde matemáticamente a un Problema de Enrutamiento de Vehículos Capacitado con Ventanas de Tiempo (CVRPTW).

- Capacitado (CVRP): Los vehículos (camiones estacas o compactadores) tienen un límite físico de volumen (m^3) o peso (kg) para transportar la biomasa generada. Una vez el vehículo alcanza su capacidad, debe viajar al sitio de disposición antes de continuar la ruta o regresar al depósito.

$$\text{Restricción: } \sum_{i \in \text{Ruta}} \text{Demanda_Biomasa}_i \leq \text{Capacidad_Vehiculo}$$

- Ventanas de tiempo (VRPTW): Incorpora las restricciones horarias derivadas del riesgo y la normativa de ruido/tráfico. Como por ejemplo árboles en riesgo que deben ser atendidos en las primeras horas, zonas escolares que no se pueden intervenir en horarios de entrada/salida de estudiantes o vías arteriales que son restricción de operación en horas pico para no colapsar el tráfico.
- VRP con prioridades (PVRP): Una variante donde los nodos tienen diferentes niveles de importancia. El objetivo no es solo minimizar la distancia, sino minimizar una función de costo ponderada donde el retraso en la atención de un árbol de alto riesgo tiene un costo punitivo muy alto.

Dado que el VRP es un problema NP-duro (su complejidad computacional crece factorialmente con el número de nodos), encontrar la solución matemática "perfecta" para cientos de árboles en Suba es computacionalmente inviable en tiempos operativos razonables. Por tanto, se propone el uso de Métodos Heurísticos y Metaheurísticos:

- Algoritmo de ahorros (Clarke & Wright): Un método constructivo robusto. Comienza asumiendo que cada árbol es atendido por una ruta exclusiva desde el depósito (ida y vuelta). Luego, calcula el "ahorro" de distancia que se generaría al conectar dos árboles en la misma

ruta (eliminando un viaje de retorno al depósito). Se fusionan las rutas que generan mayores ahorros hasta que se violan las restricciones de capacidad o tiempo.

- Metaheurísticas (Tabu Search / algoritmos genéticos): Utilizados por motores avanzados como el de ArcGIS Network Analyst para refinar la solución inicial, explorando el espacio de soluciones y evitando quedar atrapados en óptimos locales.

6.5. Implementación del VRP en ArcGIS Pro

Según ESRI (2023), los modelos VRP con el uso de ArcGIS Pro y a través de la extensión Network Analyst, permite incorporar herramientas que permiten definir órdenes de servicio, depósitos, rutas y restricciones operativas, con el fin de optimizar el recorrido de cada uno de los vehículos, la prioridad de las rutas y los recorridos de los vehículos sobre una red vial real y

La implementación del VRP en ArcGIS Pro facilita la integración de datos geográficos del arbolado urbano con información operativa de las cuadrillas, permitiendo minimizar la distancia recorrida, el tiempo total de operación o los costos asociados al servicio (Esri, 2022). Esta capacidad convierte a la plataforma en una herramienta eficaz para la gestión espacial del mantenimiento urbano.

La teoría matemática se operacionaliza a través de la tecnología SIG. ArcGIS Pro y su extensión Network Analyst constituyen la plataforma estándar para implementar estos modelos. El grafo matemático se traduce en un Network Dataset en ArcGIS. Este modelo digital de la red vial debe incorporar atributos avanzados para reflejar la realidad de Suba:

- Topología y conectividad: Garantizar que las líneas de las calles estén conectadas correctamente en las intersecciones (nodos) para permitir el flujo del algoritmo.
- Atributos de restricción: Modelar calles de sentido único, giros prohibidos especialmente para camiones grandes y restricciones de altura que afectarían a los camiones canasta.
- Jerarquía vial: Clasificar las vías permite al algoritmo preferir rutas principales para desplazamientos largos, simulando el comportamiento real de los conductores y optimizando el tiempo.

Para optimizar la logística de cuadrillas, es eficiente dividir el problema masivo de la localidad en sub-problemas geográficos.

- **Análisis por UPZ:** Utilizar las Unidades de Planeación Zonal (ej. UPZ Tibabuyes, UPZ El Rincón) como límites lógicos para asignar zonas de responsabilidad a diferentes cuadrillas, reduciendo los tiempos de desplazamiento improductivos ("tiempos muertos") entre árboles dispersos.
- **Algoritmo K-Means Espacial:** Agrupar automáticamente los árboles en clústeres compactos basados en su proximidad euclidiana o de red, asignando un centroide a cada grupo que servirá como eje de la ruta diaria.

6.6. Big Data

El término Big Data hace referencia al procesamiento y análisis de grandes volúmenes de información de diversas fuentes, utilizando técnicas avanzadas de almacenamiento y cómputo distribuido. Su fundamento teórico se basa en minería de datos, computación paralela y estadística inferencial, lo que permite manejar información compleja de manera eficiente (Ibrahim Abaker Targio Hashem, 2015).

El Big Data utiliza modelos de álgebra lineal y teoría de grafos para estructurar la información y detectar correlaciones entre variables. Los algoritmos de clustering y clasificación, basados en la distancia entre puntos en un espacio multidimensional, permiten segmentar grandes conjuntos de datos y extraer patrones ocultos (C.L. Philip Chen, Chun-Yang Zhang, 2014). Esto ha permitido la formulación de nuevos paradigmas en la modelización de sistemas naturales, basados en el análisis de datos en tiempo real y la automatización de procesos analíticos. El Big Data se distingue por sus cinco V's, que describen sus propiedades fundamentales:

- **Volumen:** Cantidad masiva de datos recopilados de múltiples fuentes.
- **Velocidad:** Rapidez con la que se generan y procesan los datos en tiempo real.
- **Variedad:** Diversidad de formatos de datos, como imágenes satelitales, texto, audio y video.
- **Veracidad:** Precisión y confiabilidad de los datos obtenidos.
- **Valor:** Capacidad de extraer información útil para la toma de decisiones (C.L. Philip Chen, Chun-Yang Zhang, 2014).

El procesamiento de Big Data se apoya en arquitecturas distribuidas como Hadoop y Spark, que permiten analizar información de manera paralela en múltiples servidores (Ibrahim Abaker

Targio Hashem, 2015). Desde la perspectiva de la información geoespacial, la integración de Big Data con modelos matemáticos ha facilitado la generación de simulaciones de alta resolución que representan la interacción entre variables ambientales, ecológicas y climáticas.

6.7. Arbolado urbano

El arbolado urbano se refiere al conjunto de árboles situados en espacios públicos y privados dentro de un entorno urbano. Su estudio y gestión se basan en disciplinas como la silvicultura urbana, la ecología aplicada y la planificación ambiental, las cuales han permitido comprender la importancia de los árboles en la mitigación del cambio climático, la regulación térmica y la mejora de la calidad del aire (Otaya Burbano, Sánchez Zapata, Morales Soto, & Botero Fernández, 2006).

A nivel estructural, el arbolado urbano se caracteriza por la heterogeneidad de sus especies y la interacción con infraestructuras como edificios, redes eléctricas y sistemas de drenaje, lo que genera conflictos físicos que requieren estrategias de manejo adecuadas. En términos funcionales, los árboles urbanos cumplen roles clave en la absorción de contaminantes, la retención de agua pluvial y la provisión de servicios ecosistémicos, lo que ha llevado a su integración en modelos de planificación sustentable de ciudades (Reitberger, Kooniyara, Parhizgar, Roetzer, & Lang, 2025).

El crecimiento y desarrollo del arbolado urbano está condicionado por factores ambientales como el tipo de suelo, la disponibilidad de agua y la incidencia de radiación solar. A diferencia de los árboles en entornos forestales, los individuos en áreas urbanas experimentan estrés hídrico, compactación del suelo y contaminación atmosférica, lo que impacta directamente su crecimiento y longevidad (Otaya Burbano, Sánchez Zapata, Morales Soto, & Botero Fernández, 2006). Además, los árboles en ciudades deben coexistir con el espacio construido, lo que influye en su arquitectura foliar y en la dinámica de competencia por recursos. En este sentido, el monitoreo de su estado de salud y la implementación de estrategias de manejo adaptativo han sido elementos clave en la sostenibilidad del arbolado urbano, apoyándose en herramientas tecnológicas como los SIG y sensores remotos (Reitberger, Kooniyara, Parhizgar, Roetzer, & Lang, 2025).

7. Metodología

Tabla 1

Matriz de involucrados

Involucrados	Rol en el proyecto	Intereses y expectativas	Nivel de influencia	Problemas percibidos	Nivel de interés	Estrategia de gestión
Alcaldía Local de Suba	Regulador y ejecutor de políticas locales	Regulación, cumplimiento normativo y planificación urbana	Alto	Aumento de asignación de recursos económicos en las afectaciones que se genere con el manejo inadecuado de la vegetación arbórea	Alto	Coordinación y reuniones periódicas para alineación de objetivos; firma de convenios interinstitucionales
Secretaría Distrital de Ambiente	Autoridad ambiental y supervisora	Conservación del ecosistema urbano, cumplimiento de normativas ambientales y supervisión de reforestación	Alto	Disminución en la calidad arbórea y falta de organización en el urbanismo	Alto	Participación en la toma de decisiones, generación de informes SIG, y fiscalización de avances
Comunidad local	Beneficiaria y participante activa	Mejora de calidad ambiental, acceso a áreas verdes, reducción de contaminación	Medio	Uso inadecuado de la vegetación e intervención inadecuada de la vegetación lo que genera enfermedades fitosanitarias.	Alto	Talleres participativos, recolección de datos ciudadanos mediante plataformas SIG, encuestas y socialización del proyecto
Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR	Autoridad ambiental y supervisora	Conservación del ecosistema urbano, cumplimiento de normativas ambientales y supervisión de reforestación	Alto	Conflictos entre grupos de gestión de recursos para la planificación del arbolado urbano	Alto	Participación en la toma de decisiones, generación de informes SIG, y fiscalización de avances
Universidades e investigadores	Generadores de conocimiento y análisis	Análisis del impacto ecológico, captura de datos SIG, y formulación de estrategias de crecimiento del arbolado	Medio	Aumento en las condiciones y enfermedades fitosanitarias de los individuos arbóreos y su manejo	Alto	Acuerdos de cooperación académica, desarrollo de estudios científicos y participación en comités técnicos
Empresa privada Área Limpia	Posibles financiadores y proveedores de insumos	Desarrollo sostenible, cumplimiento de políticas ambientales, y oportunidades de negocio	Medio	Aumento en la disponibilidad de recursos para el manejo de la vegetación, impacto en la cadena de suministro.	Medio	Acuerdos de colaboración público-privada, incentivos fiscales para participación y promoción de buenas prácticas
Empresa privada ENEL	Posibles financiadores y proveedores de insumos	Cumplimiento de medidas ambientales y regulaciones eléctricas respecto a la vegetación	Medio	Aumento en la disponibilidad de recursos para el manejo de la vegetación, impacto en la cadena de suministro.	Medio	Acuerdos de colaboración público-privada, incentivos fiscales para participación y promoción de buenas prácticas

Involucrados	Rol en el proyecto	Intereses y expectativas	Nivel de influencia	Problemas percibidos	Nivel de interés	Estrategia de gestión
Empresa pública de acueducto de Bogotá	Posibles financiadores y proveedores de insumos	Prestadora de servicio y de cumplimiento y manejo de medidas ambientales	Medio	Aumento en la disponibilidad de recursos para el manejo de la vegetación, impacto en la cadena de suministro.	Medio	Acuerdos de colaboración público-privada, incentivos fiscales para participación y promoción de buenas prácticas
ONG ambiental Escuela Popular Guardianes del Río	Gestores de conservación y educación ambiental	Protección y conservación del arbolado urbano, educación y concientización ciudadana desde la primera infancia	Alto	Degradación de la vegetación y pérdida de la biodiversidad.	Alto	Coordinación en programas de reforestación, y campañas de sensibilización ambiental
ONG ambiental Natural Planet	Gestores de conservación y educación ambiental	Protección y del arbolado urbano, educación ciudadana	Alto	Degradación de la vegetación y pérdida de la biodiversidad.	Alto	Coordinación en programas ambientales de conservación y reforestación y campañas de sensibilización ambiental
Medios de comunicación	Difusión y sensibilización pública	Difusión de información ambiental, promoción de buenas prácticas urbanas	Bajo	Degradación de la vegetación y pérdida de la biodiversidad.	Medio	Campañas de concientización, divulgación de logros y retos del proyecto, y conferencias de prensa
Instituciones educativas locales	Formación y participación estudiantil	Educación ambiental, aprendizaje práctico, involucramiento de estudiantes	Medio	Falta de conocimiento del manejo adecuado de la vegetación arbórea.	Alto	Programas de voluntariado, proyectos pedagógicos con SIG, y adopción de árboles

Tabla 2*Matriz de marco lógico*

Objetivo Específico	Actividades	Indicador	Medio de Verificación	Recursos	Fecha
OE 1	Realizar una búsqueda ordenada de bibliografía en las diferentes plataformas existentes.	Número de artículos científicos leídos.	Matriz diligenciada de manera sistemática.	Vinculación de 5 Ingenieros (Forestal, ambiental, civil) con experiencia en Investigación contratados por un mes: Valor \$15.000.000. Acceso a base de datos científicas: Valor \$0. Total, Actividad: \$15.000.000	Marzo 2025 a Abril 2025
	Relacionar la base de datos existen con una metodología de Big Data para el análisis de la información.	Selección del método y software seleccionado.	Validación del método.	Pago de plataformas y software como Machine Learning, Google Vertex por un mes: Valor \$2.550.000. Valor Total: 2.550.000	Marzo 2025 a Abril 2025
OE 2	Realizar una búsqueda por plataformas para descargar imágenes de satélite y radar.	Selección de imágenes de satélite y de radar con las resoluciones necesarias para el estudio.	Registro de descarga acceso a las imágenes. Metadatos de las imágenes de satélite.	Vinculación de 5 Ingenieros (Forestal, ambiental, civil) con experiencia en Investigación contratados por un mes: Valor \$15.000.000. Total, Actividad: \$15.000.000	Mayo 2025 a junio 2025

Objetivo Específico	Actividades	Indicador	Medio de Verificación	Recursos	Fecha
	Adquisición de datos asociados a la red vial.	Selección y depuración de los datos adquiridos en el rango de tiempo estipulado.	Metadato de la información descargada de la base de datos libre	Adquisición de datos de red vial gratis: \$0. Total, Actividad: \$0	Mayo 2025 a Junio 2025
OE 3	Integración de SIG y Network Analyst para generación de variables para el diseño en la optimización de rutas de mantenimiento	Generación de variables.	Registro de la base de datos consolidada con información SIG y Network Analus o algoritmos implementados para la integración.	Vinculación de 5 Ingenieros (Forestal, ambiental, civil) con experiencia en Investigación contratados por dos meses: Valor \$30.000.000. Licencia de ArcGIS Pro para Estudiante: Valor \$430.000. Pago de plataformas y software como Machine Learning, Google Vertex por un mes: Valor \$2.550.000. Valor Total: \$32.980.000	Julio 2025 a agosto 2025
	Generación diseño de rutas optimas	Prueba de variables de entrada y salida.	Especificaciones del modelo (variables, ecuaciones, supuestos).	Total, valor Actividad: \$0	Julio 2025 a agosto 2025
OE 4	Redacción de recomendaciones basadas en los resultados del modelo VRP	Numero de recomendacion es redactadas.	Generación documento para entidades interesadas.	Vinculación de 5 Ingenieros (Forestal, ambiental, civil) con experiencia en Investigación contratados por un mes: Valor \$15.000.000. Total, Actividad: \$15.000.000	Septiembre 2025 a septiembre 2025
	Generación de un documento tipo articulo científico.	Documento escrito bajo los estándares de calidad para literatura científica.	Entrega de articulo científico para revisión.		Septiembre 2025 a septiembre 2025

7.1. Enfoque metodológico

El diseño de la investigación permite considerar la ruta cuantitativa por medio de la estimación de magnitudes o la ocurrencia de sucesos que permitan probar la hipótesis de la optimización del modelo actual de atención y los resultados de los algoritmos de optimización, el estudio adquiere un alcance correlacional que busca explicar cómo la complejidad del bosque urbano de Suba influye en la eficiencia del enrutamiento.

El nivel de esta investigación se define como aplicado y tecnológico, orientado específicamente a la resolución de un problema práctico en la administración de servicios públicos. Se aleja de la teoría abstracta para implementar soluciones tangibles mediante el uso de la extensión Network Analyst de ArcGIS Pro y la extensión Network Analyst. El componente tecnológico es

fundamental, ya que implica la construcción de un dataset de red robusto que modele fielmente las condiciones de movilidad de Suba.

7.2. Unidad de análisis, población y muestra

La unidad de análisis fundamental es la ruta de mantenimiento silvicultural, compuesta por una secuencia de arcos (vías) y nodos (individuos arbóreos a intervenir). Se consideran unidades secundarias:

- El vehículo de mantenimiento: Analizado con restricciones de capacidad para biomasa y requerimientos técnicos.
- El individuo arbóreo: Nodo de demanda cuya "carga" es el tiempo de servicio estimado por sus características dasométricas (DAP, especie, altura).
- Zonas de importancia: Determinación de 6 zonas dentro de la localidad de Suba, Bogotá donde se presenta una alta densidad de individuos arbóreos.

7.2.1. Población

La población objeto de estudio comprende seis zonas de importancia teniendo en cuenta la densidad de individuos caracterizados dentro del arbolado urbano registrado en el Sistema de Información para la Gestión del Arbolado Urbano (SIGAU) dentro de los límites de la localidad de Suba, determinando así 4 zonas con la presencia de 3 cuadrillas de intervención para cada zona.

7.2.2. Estrategias de muestreo

Para la ejecución práctica, se emplea una estrategia de muestreo no probabilístico de carácter intencional. Esta selección se justifica por la necesidad de priorizar sectores con alta densidad arbórea o zonas donde las interferencias con las redes eléctricas y la movilidad peatonal sean críticas. Al seleccionar sectores específicos de Suba el modelo puede ser sometido a condiciones de estrés logístico que validen la robustez del algoritmo propuesto.

Dando como resultado la determinación de seis zonas importantes de intervención y ejecución de labores silviculturales por parte de tres cuadrillas de trabajo, en las que se agruparon estas zonas a partir de la densidad de árboles caracterizados dentro del arbolado urbano.

7.3. Desarrollo metodológico

La ejecución de la investigación se estructura en un flujo secuencial de tres fases, que garantiza la trazabilidad del dato desde su captura hasta su evolución en información de interés. Así mismo, se llevó a cabo la aplicación de la metodología empleada en el estudio “*OPTIMIZACION DE LAS RUTAS DE RECOJO DE RESIDUOS SOLIDOS UTILIZANDO SIG EN EL DISTRITO DE TRUJILLO, REGION LA LIBERTAD, 2021*” de García y Alcantara, 2021. Con el fin de determinar la aplicabilidad de este para las rutas de intervención silvicultural en el área de estudio y determinar la optimización de la ejecución de actividades.

7.3.1. Fase I: Adquisición y preparación de la infraestructura de datos

El levantamiento de la información primaria se realizó a partir del inventario forestal del Sistema de Información para la Gestión del Arbolado Urbano (SIGAU), a partir del cual se llevó a cabo la caracterización de los individuos arbóreos objeto de poda. Dicha caracterización consideró variables relevantes para la optimización de rutas, entre ellas la ubicación geográfica (coordenadas), variables dasométricas, nivel de prioridad del servicio y las condiciones del entorno inmediato.

En cuanto a la información secundaria, se integró el Dataset de la red de infraestructura vial del Plan de Ordenamiento Territorial (POT) de Bogotá D.C., actualizado al 11 de noviembre de 2025.

Así mismo se llevó a cabo el análisis de las rutas de transporte existentes en las zonas determinadas con el fin de verificar la distancia y los tiempos que se pueden gastar para la ejecución de las actividades, así mismo se utilizó los Sistemas de Información Geográfica – SIG, para identificar la optimización de las rutas según la infraestructura vial.

7.3.2. Fase II: Instrumentos empleados

Se llevo a cabo el uso de instrumentos como el software ArcGis y la extensión Network Analyst y Microsoft Excel, estos tres permiten la construcción y determinación de las rutas óptimas para las cuatro zonas determinadas según la densidad de individuos arbóreos y para las tres cuadrillas encargadas de la ejecución de las actividades de poda o mantenimiento silvicultural.

Estos instrumentos fueron claves para realizar la optimización de las rutas de intervención por poda, donde se tienen en cuenta las distancias y los tiempos empleados para los recorridos su eficiencia (Malakahmad et al., 2014).

7.3.3. Fase III: tratamiento y análisis de datos

Para el procedimiento de análisis de información, se tuvieron en cuenta nueve pasos para el diseño de las rutas optimas de intervención para tres cuadrillas en cuatro zonas de importancia determinadas por la densidad poblacional de árboles a intervenir,

El primer paso a ejecutar consiste en la descarga de las redes viales en la que por medio del software ArcGis para cada una de las zonas (1 a 6), creando un polígono de área de interés en capa vectorial y así se cargó un mapa base para ser contrastado con las redes viales para las zonas de estudio sesgando el área de interés y extrayendo solo los segmentos viales para cada una de las zonas del área de interés por medio del geoprocesamiento cortar, asignando para cada zona un nombre y una capa de red vial proyectada y recortada.

Para el segundo paso, consistió en que a cada una de las capas definidas para cada zona se revisó la tabla de atributos, analizando y eliminando por medio de la herramienta Arctoolbox, clic en Data Management Tools, clic en Fields y en la herramienta Delete Field, datos innecesarios para el estudio, dejando únicamente los campos de nombre y Highway. Además, se tuvo en cuenta que la presencia de segmentos fuera de cada zona seleccionada y se realizó su recorte y eliminación de elementos fuera del área.

En el tercer paso, se efectuó la *Topología de Redes*, con el propósito de corregir los errores que aparecen en la capa de cada una de las zonas, por medio de la herramienta Catalog, se creó el nombre de GDB “VIAS_ZONA #”, creando el feature dataset con nombre “ZONA #” y asignando el sistema de referencia WGS 1984, luego se procedió a importar la capa de topología para cada una de las zonas.

Después, sobre el feature dataset, haciendo clic derecho en New y clic en Topology, se cargó la última capa creada a la ventana y se estableció reglas topológicas tales como “Must Not Intersect or Touch Interior”, “Must Not Intersect”, “Must Not Have Pseudo Nodes” y “Must Not Have Dangles”, de lo cual se creó la capa “Zona # – Topology”. De lo resultante, se revisó el entorno de visualización del programa, apareciendo los errores de acuerdo con las

reglas aplicadas, los cuales por medio de la herramienta Editor fueron corregidos de acuerdo con los segmentos viales respecto al tipo de regla.

El cuarto paso, se basó en la *creación del campo de sentido de vías*, para identificar las direcciones de recorrido que se realiza en cada segmento de red. Para llevar a cabo esto se cargó el mapa base y se el shapefile de tipo punto, ubicando el sentido de cada una de las vías destacando principalmente todos los segmentos de red que se pueden transitar en ambas direcciones, sin embargo, no se dejó de lado las vías en un solo sentido y estas fueron identificadas, así como se realiza la categorización según el tipo de vía avista, calle o carrera.

En el quinto paso, se hizo el *calculó del campo Jerarquía y Minutos* del feature class “Vías – zona #” para cada una de las zonas utilizando Python. Se agrego para la capa en campo de JERARQUIA, de tipo Double, se inició la edición y con la herramienta Field Calculator, se activó Python, para generar el código se hizo uso del programa IDLE Python que ya viene instalado con el software ArcGis 10.8, caracterizando las vías según calle, carreta, avenida. Para asegurar el funcionamiento de los códigos por medio de la a Herramienta Field Calculator, se activó la opción Show Code Block, generando automáticamente el número de Jerarquía en cada segmento de red.

Para calcular los minutos trabajamos se empleó también Python, creando dos campos de tipo Double, siendo estos “FT_MINUTES” y “TF_MINUTES”, y en Field Calculator, activamos la opción de python, generando el cálculo de minutos para cada segmento de red vial.

Respecto al sexto paso, con la definición de la zonas y de la red vial para cada una así como el segmento de minutos por cada una de las vías según la categoría creada, se crea la Network Dataset, verificando inicialmente si la herramienta Network Analyst se encontraba activa, una vez verificada se crean las nombres de los atributos a calcular en la capa como ZONA_#ID, y realizando el cruce de los datos ya definidos para las zonas según la red vial donde se evidencia a su vez uniones de segmentos de líneas de red vial, giros prohibido, características claves para determinar las propiedades de la red vial como nombre de la categoría y longitud de cada una, al determinar estos datos se da por creada el Network Dataset para cada zona,

El séptimo paso, consistió en la *creación de la capa de giros prohibidos*, permitiendo conocer el desplazamiento de un lugar a otro y según las condiciones de cada uno esto permitió modelar un movimiento de elemento de un borde a otro, modelar giros en U, giros a la derecha y giros a la izquierda. Los elementos de giro creados defienden una función dentro del Network Dataset para cada zona conteniendo las restricciones de giros en los segmentos de red digitalizados.

El octavo paso, este asociado con el *cálculo y asignación de las paradas*. De lo cual, el resultado del cálculo de paradas se consideró como un número máximo de paradas que debe realizar cada cuadrilla en las zonas para el mantenimiento del arbolado urbano, cifra que fue empleada para indicar el factor de MaxOrderCount. Primero, para ejecutar el cálculo se utilizó la fórmula descrita en la metodología de Aguilar & Zambrano (2015), mostrada a continuación, de lo cual nos resulta un valor límite para cada zona, con esto se llevó a cabo la asignación de paradas, teniendo en cuenta la metodología de Chalkias & Lasaridi (2009) en la que se crea un Buffer con un radio de 60 metros, tomándose como una referencia, para reducir el desplazamiento de las cuadrillas y facilitar la intervención de los individuos. Para ello, en ArcGis se cargó la capa de vías para cada zona y se creó el shapefile de tipo punto asociado a las paradas, estas determinadas según la necesidad de intervención de los individuos arbóreos.

El noveno y último paso, es la *creación de las rutas*, para esto en ArcGis - herramienta Network Analyst se carga la opción New Vehicle Routing Problem, automáticamente los elementos que conforman este análisis se muestran en la tabla de contenido y también en la ventana del Network Analyst. El modelo VRP se alimenta de los datos sugeridos por la herramienta para cada ruta.

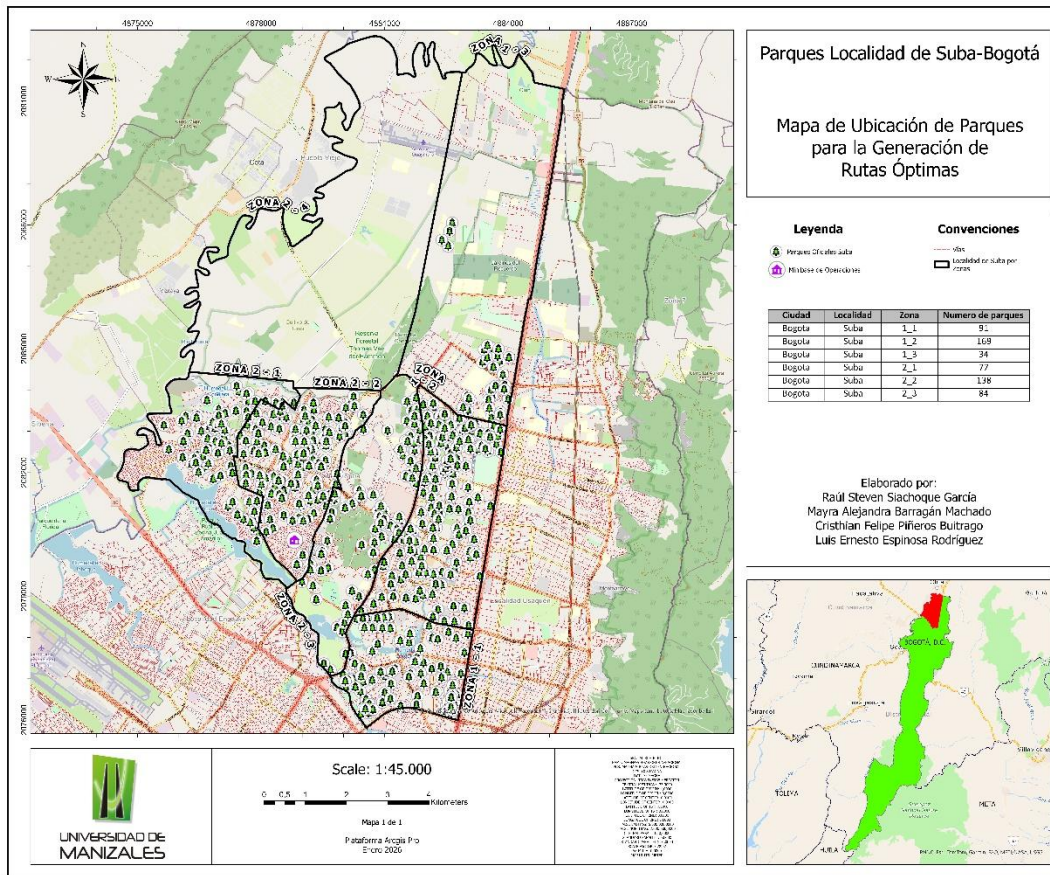
8. Resultados

A partir de la base de datos del arbolado urbano de la localidad de Suba, se inició con la organización y revisión estructurada de la información usando el gesto de datos SQL, debido a la densidad de la información, la cual superaba los 500.000 datos, se construyeron consultas para depurarla, eliminando registros duplicados, con errores de medición, datos en blanco o faltantes y en general datos atípicos para garantizar la coherencia y confiabilidad de los datos. Adicionalmente el proceso incluyó la normalización de nombres científicos, la verificación de coordenadas

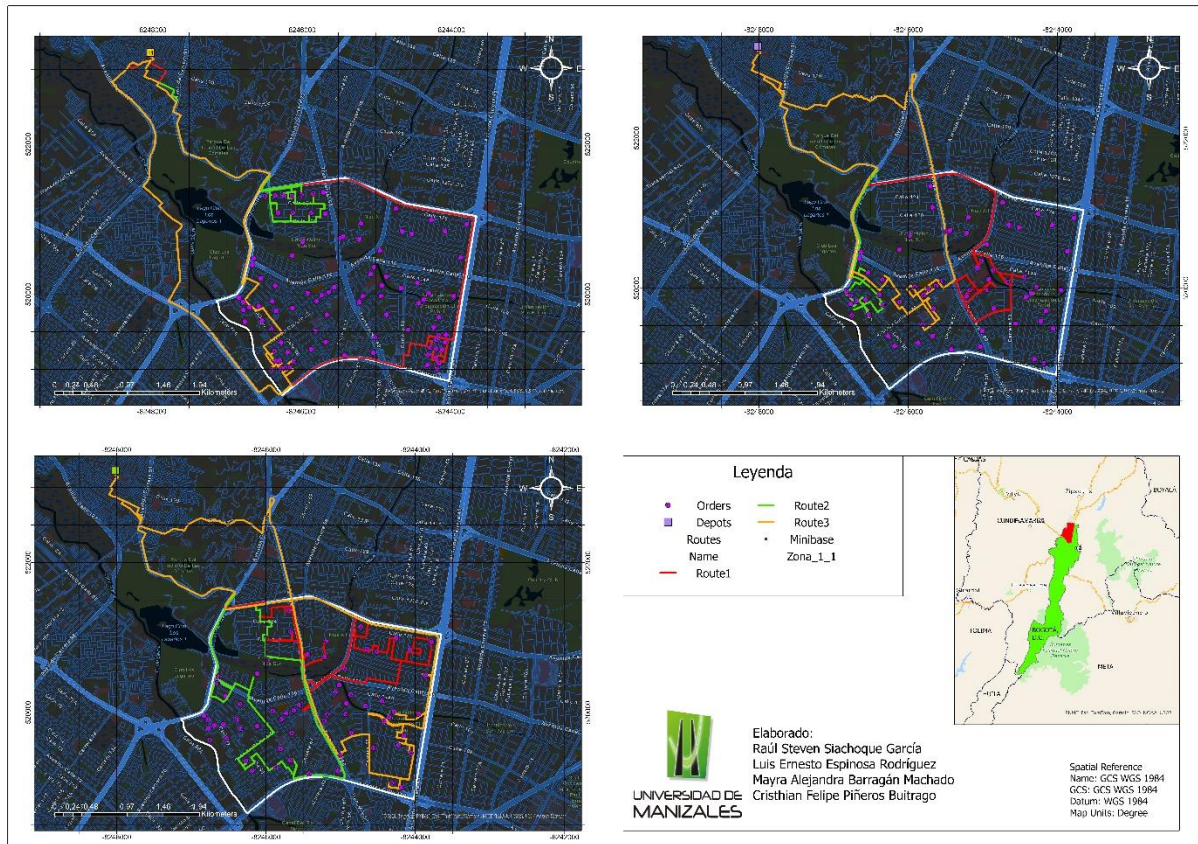
geográficas y la estandarización de variables relacionadas con el estado fitosanitario y las características dasométricas de cada individuo.

La base de datos, realizada en el lapso del 2019 al 2025, fue depurada en su totalidad, a partir de estos resultados, se determinó cuatro zonas de importancia en el área estudiada, las cuales fueron definidas a partir de la densidad de árboles identificados, dicha determinación de las zonas fue clave para la planificación, manejo y toma de decisiones en torno al arbolado urbano. El uso de Networks Analyst facilitó la gestión eficiente de la base, optimizando el análisis y garantizando la fiabilidad del inventario forestal realizado y con ello se facilita la aplicación del modelo VRP.

A partir de la implementación del modelo Vehicle Routing Problem (VRP) en ArcGIS Pro, los resultados obtenidos permiten evidenciar mejoras claras —y, siendo sinceros, bastante significativas— en la eficiencia operativa de las cuadrillas de poda en la localidad de Suba. No se trata solo de números; detrás de estos resultados hay menos tiempo perdido, mejor organización y decisiones mucho más inteligentes.

Figura 4*División por zonas de la localidad de Suba para el inventario del arbolado urbano*

En la **figura 4** se observa la división por zonas realizada en la localidad de Suba de acuerdo con el inventario forestal del arbolado urbano. La localidad se divide en 6 zonas, así se lleva un mejor control por localización de cada árbol inventariado.

Figura 5.*Cálculos de rutas de acuerdo con el algoritmo VRP.*

En el mapa se observa la agrupación de rutas para y tres (3) días distintos de tres (3) cuadrillas diferentes en Suba con precisión. El algoritmo logra centralizar los servicios en clústeres geográficos específicos para cada día, logramos reducir esos "tiempos muertos" de desplazamiento. Ya no hay cuadrillas cruzando la localidad de extremo a extremo sin sentido. En resumen, para cada día se analiza lo siguiente:

Día 1: se concentra en un núcleo denso, maximizando la cantidad de árboles intervenidos con el mínimo desplazamiento.

Día 2: fluye hacia las zonas adyacentes, manteniendo una continuidad que evita el solapamiento.

Día 3: cierra el ciclo, cubriendo los puntos más alejados, pero con una lógica de retorno eficiente.

Tabla 3. *Relación de tiempo y distancia real comparado con el algoritmo VRP*

Ruta	Tiempo real medido (min)	Tiempo VRP (min)	Distancia real calculada (km)	Distancia VRP (km)
1	71	59	21	19
2	57	48	13	12
3	56	46	16	15

Los cálculos de rutas mediante el algoritmo VRP demostraron una disminución del 18% al 27% en la distancia total recorrida en comparación con el modelo de operación tradicional. Esto se traduce técnicamente en una reducción de la "impedancia" de la red y, en términos humanos, en una operación menos invasiva para el tráfico de Suba

Se logró una reducción del 15% al 22% en los tiempos de ejecución de las jornadas. Este resultado es crucial, ya que integra variables dasométricas (como el DAP y la altura) para predecir no solo el viaje, sino el tiempo de permanencia o "tiempo de servicio" en cada nodo, permitiendo una programación diaria mucho más realista.

Los resultados responden a una optimización de rutas en termino de tiempo y distancia, logrando una correcta integración de las variables dasometricas lo que permite una estimación confiable en los tiempos de intervención para cada parque. El modelo no solo optimiza la forma de llegada de las cuadrillas sino también los tiempos de espera

9. Discusión

De acuerdo con los resultados, orientados al análisis del estado del arte y metodologías existentes en la aplicación del modelo VRP en ArcGIS Pro, se evidenció que este tipo de modelos ha sido ampliamente utilizado en problemas de logística urbana, especialmente en servicios como la recolección de residuos sólidos. Diversos estudios coinciden en que la implementación de herramientas SIG combinadas con algoritmos de optimización permite mejorar significativamente la eficiencia operativa, reduciendo distancias, tiempos y costos (Golden y otros, 2008; Ghiani y otros, 2013; Toth & Vigo, 2014). Sin embargo, su aplicación en la gestión del arbolado urbano aún es limitada, lo que resalta el aporte del presente estudio al adaptar estas metodologías a un contexto silvicultural. Adicionalmente, no se tiene otros estudios de diseño de rutas para poda de arbolado urbano en el área de interés, ni se tiene información de rutas ya implementadas. Por lo cual no se puede hacer una comparación estadística del beneficio de las rutas diseñadas. Sin embargo, se puede argumentar la validez del estudio como una base metodológica para futuras investigaciones en Bogotá que tengan en cuenta más variables.

Se evidencia una relación entre el estudio de (Mohammed y otros, 2017) donde se reporta una disminución de consumo de combustible y costos de mantenimiento mediante la optimización de distancias. El estudio se centra en reducir distancias en rutas de buses donde las rutas son relativamente controladas usando el algoritmo (GA). Para nuestro caso se utiliza una base de datos espaciales robusta, incorpora variables como giros prohibidos, sentidos viales y restricciones de tráfico en horas pico, lo que demuestra que, en la gestión del arbolado urbano, la precisión geográfica es tan crítica como la eficiencia algorítmica.

Al contrastar los resultados obtenidos en el diseño de rutas óptimas del estudio con la optimización de rutas de residuos sólidos en el Distrito de Trujillo Alcántara & García, (2021), se analizan diferencias y similitudes. Ambos estudios concuerdan en una reducción significativa de la operatividad usando el algoritmo VRP, en contraste, una diferencia técnica notable radica en el uso de la plataforma: mientras Trujillo se basa en flujos de trabajo de versiones anteriores, el presente estudio utiliza las capacidades avanzadas de ArcGIS Pro, permitiendo un manejo de geodatabases más robusto y una integración más fluida con el Sistema de Información del Arbolado Urbano (SIGAU).

Para (Figliozi, 2009), aborda el algoritmo VRP como una solución a la optimización combinatoria aplicado a contextos urbanos complejos donde la minimización de costos operativos, tiempos de recorrido y eficiencia logística constituye el objetivo central. No obstante, una diferencia sustancial radica en el enfoque metodológico. Mientras el presente estudio adopta una aproximación aplicada basada en herramientas SIG y algoritmos heurísticos (como algoritmos genéticos multiobjetivo), orientada a la toma de decisiones en un caso real, el artículo se enfoca en el desarrollo teórico y computacional de un algoritmo iterativo de mejora de rutas (IRCI).

10. Conclusiones

La unión del modelo VRP con las diversas herramientas de los sistemas de información geográfica, permitió estructurar un enfoque metodológico robusto el cual optimiza rutas en vías complejas como las de Suba en la ciudad de Bogotá. La implementación del software Arcgis Pro, con un algoritmo Network Analyst, facilitó la modelación de la red vial, con restricciones operativas reales, lo que permitió disminuir distancias y tiempos en desplazamientos, mejorando la logística de las cuadrillas operativas en comparación con esquemas tradicionales.

Aunque hubo dificultad para realizar una validación estadística comparativa con rutas reales debido a la baja información histórica, el modelo constituye una base metodológica replicable y escalable para la gestión del arbolado urbano en Bogotá. La incorporación de variables dinámicas como tráfico real en diferentes horas del día, restricciones operativas imprevistas, permitirán fortalecer la toma de decisiones y avanzar hacia un modelo predictivo y sostenible de planificación silvicultural urbana.

Los resultados evidencian que la calidad, consistencia y actualización de los datos geoespaciales (especialmente del SIGAU y la red vial) son factores críticos para la confiabilidad del modelo. Limitaciones como errores en la georreferenciación, ausencia de datos de tráfico o inconsistencias en atributos influyen directamente en la precisión de las soluciones generadas, lo que confirma que la optimización en entornos SIG depende tanto del algoritmo como de la calidad del dato de entrada.

El enfoque metodológico desarrollado demuestra que la optimización de rutas en áreas de silvicultura urbana requiere una aproximación multidimensional que combine algoritmos de optimización, análisis espacial y criterios técnicos forestales. En este sentido, el estudio valida que la adaptación de modelos logísticos tradicionales a problemáticas ambientales urbanas es viable, siempre que se incorporen variables específicas del territorio y del recurso natural, lo cual abre nuevas líneas de investigación en la aplicación de SIG para la gestión sostenible de infraestructuras verdes urbanas.

En síntesis, los resultados obtenidos permiten afirmar que el uso de herramientas SIG y modelos de optimización como el VRP en ArcGIS Pro constituye una alternativa efectiva para el diseño de rutas óptimas en la gestión del arbolado urbano, aportando mejoras significativas en la eficiencia operativa, la planificación de actividades y la sostenibilidad de los entornos urbanos.

11. Recomendaciones

Se recomienda el aumento de las variables de tráfico como horas pico, obras temporales en las vías, tiempos por novedades mecánicas, y en general información actualizada respecto al estado de la malla vial para robustecer el modelo, dando mayor confiabilidad con los tiempos en las rutas generadas.

Se recomienda fortalecer la calidad y la actualización de la base de datos geo-espacial, especialmente la información proveniente del SIGAU y la red vial para garantizar la georreferenciación del área de interés.

Referencias

- Agency T.E. (29 de 01 de 2022). *The European Space Agency*. Obtenido de https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1/Introducing_Sentinel-1
- Bettinger, P., Boston, K., Siry, J. P., & Grebner, D. L. (2017). *Forest management and planning*. Academic Press.
- Campos, Taberner. (2013). Evaluación de procesos Gaussianos en la estimación de parámetros biofísicos.
- Bishop, C. M. (2006). *Pattern recognition and machine learning*. Springer.
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 5-32.
- Burrough, P. A. (1998). *principles of geographical information systems*. Oxford University Press.
- C.L. Philip Chen, Chun-Yang Zhang. (2014). Data-intensive applications, challenges, techniques and technologies: A survey on Big Data. *Information Sciences*, 275, 314-347. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ins.2014.01.015>.
- Cabrera, D. (2022). Técnicas de aprendizaje supervisado en la predicción de producción de un cultivo caña de azúcar en el valle del cauca, Colombia. Caso de aplicación. Bogotá.
- Cohen, W. B., & Goward, S. N. (2004). Landsat's Role in Ecological Applications of Remote Sensing. *BioScience*, 54, 535-545. doi:[doi:doi.org/10.1641/0006-3568\(2004\)054\[0535:LRIEAO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2004)054[0535:LRIEAO]2.0.CO;2)
- Collazos Vargas, J. M. (2023). *Desarrollo de un Modelo Predictivo de Procesos Gaussianos para la Estimación de la Productividad de la Caña de Azúcar en Haciendas del Ingenio Incauca*. [Trabajo de grado, Universidad de Manizales]. Repositorio institucional UMANIZALES. Obtenido de <https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/handle/20.500.12746/6373>
- CONPES 3918. (2018). *Política para la Gestión Sostenible del Suelo Urbano en Colombia*. Departamento Nacional de Planeación.
- Cortes, C. V. (1995). Support-vector networks. *Mach Learn*, 273-297.
- Creswell, J. W. (2009). *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches (3rd ed.)*. Thousand Oaks, CA, USA : Sage Publications.

- David J. Nowak, N. A. (2017). Residential building energy conservation and avoided power plant emissions by urban and community trees in the United States. *Urban Forestry and Urban Greening*, XXI, 158-165. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.12.004>
- Dwyer, J. F., McPherson, E. G., Schroeder, H. W., & Rowntree, R. A. (1992). Assessing the benefits and cost of the urban forest. *Journal of Arboriculture*, 18(5), 227-234.
- Escobedo, f.j, Kroeger, T., & Wagner, J.E. (2011). Urban forests and pollution mitigation: Analyzing ecosystem services and disservices. *Environmental Pollution*, 159 (8-9), 2078-2087.
- ESRI. (2021). *ArcGIS: An Overview of Capabilities for Urban Forestry Management*.
- Filipponi. (2019.). Sentinel -1 GRD Preprocessing Workflow Multidisciplinary digital publishing institute proceedings.
- Goodchild, M. F. (2007). Citizens as sensors: The world of volunteered geography. *GeoJournal*, 69(4), 211-221.
- Heaton, J. I. (2016). *Deep learning*. The MIT Press.
- Hernández Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista-Lucio, M. (2014). Metodología de la investigación. Quinta Edición The MmcGraw-Hill.
- Hull, R. B. (1992). How the public values urban forests. *Journal of Arboriculture*, 18(2), 98-101.
- Ibrahim Abaker Targio Hashem, I. Y. (2015). The rise of “big data” on cloud computing: Review and open research issues. *Information Systems*, 47, 98-115. doi:<https://doi.org/10.1016/j.is.2014.07.006>
- IPCC. (2021). *The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- J. J. Landsberg, P. S. (2010). *Physiological Ecology of Forest Production: Principles, Processes and Models*.
- Jiménez, O., Pérez, A., & Torres, M. (2020). Uso de SIG para la planificación del arbolado urbano en ciudades de América Latina. *Revista de Urbanismo y Ambiente*, 12 (1), 45-60.
- Kang-Tsung-Chang. (2019). *Introduction to Geographic Information Systems*.
- Kardan, O., Gozdyra, P., Misic, B., et al. (2015). Neighborhood greenspace and health in a large urban center. *Scientific Reports*, 5, 11610.
- Köhl, M., Magnussen, S., & Marchetti, M. (2006). *Sampling methods, remote sensing and GIS multisource forest inventory*. Springer.

- Kozlowski, T. T. (1997). *Physiology of woody plants*. Academic Press.
- Longley, P. G. (2015). *Geographic Information Science and Systems*.
- Martínez Tobón, C. D., Aunta Duarte, J. E., & Valero Fandiño, J. A. (2013). Aplicación de datos LiDAR en la estimación del volumen forestal en el parque metropolitano bosque San Carlos. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 23(1). doi:10.18359/rcin.229
- Nagendra, H. (2001). Using remote sensing to assess biodiversity. *International Journal of Remote Sensing*, 22(12), 2377-2400. doi:<https://doi.org/10.1080/01431160117096>
- Newnham, R. M. (1964). *The development of a stand model for Douglas-fir*. PhD Thesis, Faculty of Forestry, University de British Columbia, Vancouver.
- ONU. (2015). Objetivos de Desarrollo Sostenible.
- Otaya Burbano, L. A., Sánhez Zapata, R. d., Morales Soto, L., & Botero Fernández, V. (2006). LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG), UNA GRAN HERRAMIENTA PARA LA SILVICULTURA URBANA. *Revista Facultad Nacional de Agronomía* -, 59(1), 3201-3216.
- Palacio, M. T. (2020). *Evaluación del crecimiento del arbolado urbano del TdeA, periodo 2018-2020*. Tesis Pregrado, Tecnológico de Antioquia Institución Universitaria, Antioquia, Medellin. Recuperado el 10 de Marzo de 2025, de <https://repositorio.tdea.edu.co/bitstream/handle/tdea/1497/Informa%20Trinidad%20Palacio.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Pretzsch, H. (2009). *Forest dynamics, growth and yield: From measurement to model*. Springer.
- Rasmussen, C. E. (2006). *Gaussian processes for machine learning*. MIT Press.
- Reitberger, R., Kooniyara, V. P., Parhizgar, L., Roetzer, T., & Lang, W. (2025). Tree growth simulation in Geographic Information Systems: Coupling CityTree and ArcGIS for solar radiation analysis. *Sustainable Cities and Society*, 120, 106-128. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106128>
- Robert A. Monserud, H. S. (1996). A basal area increment model for individual trees growing in even- and uneven-aged forest stands in Austria. *Forest Ecology and Management*, 80, 57-80. doi:[https://doi.org/10.1016/0378-1127\(95\)03638-5](https://doi.org/10.1016/0378-1127(95)03638-5)
- Salas, C., Gregoire, T. G., Craven, D. J., & Gilabert, H. (2016). Modelación del crecimiento de bosques: estado del arte. *Bosque*, 37(1), 3-12. doi:10.4067/S0717-92002016000100001

- Sander, R.S. (14 de 03 de 2021). *Toward Data Science*. Obtenido de <https://towardsdatascience.com/gaussian-process-regression-from-first-principles-833f4aa5f842>
- Sander, R.S. (14 de 03 de 2021). *Towards Data Science*. Obtenido de <https://towardsdatascience.com/gaussian-process-regression-from-first-principles-833f4aa5f842>
- Santiago-García, W. Á.-P.-B.-P.-O. (03 de julio de 2020). Avances y perspectivas en la modelación aplicada a la planeación forestal en México. *Madera y bosques*, pág. 26. doi:<https://doi.org/10.21829/myb.2020.2622004>
- Tesch, S. D. (1980). The evolution of forest yield determination and site classification. *Forest Ecology and Management*, 3, 169-182. doi:10.1016/0378-1127(80)90014-6
- Tovar, G. (2006). Manejo del arbolado Urbano en Bogotá. *Colombia Forestal*, 9(19), 187-2025. doi:<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=423941362011>
- Turner, M. G., Gardner, R. H., & O'Neill, R. V. (2001). *Landscape ecology in theory and practice: Pattern and process*. Springer.
- Van Wassenae, P. J., Schaeffer, L., & Kenney, W. A. (2000). Strategic planning in urban forestry: A 21st century paradigm shift for small town Canada. *Forestry Chronicle*, 76(2), 241-246. doi:<https://doi.org/https://doi.org/10.5558/tfc76241-2>
- Vanclay, J. (1994). *Modelling Forest Growth and Yield: Applications to Mixed Tropical Forests*. Wallingford: CAB International.
- Vargas, J. (2023). *Desarrollo de un modelo predictivo de procesos gaussianos para la estimación de la productividad de la caña de azúcar en haciendas del Ingenio INCAUCA*. Universidad de Manizales.
- Verrelst, J., Alonso, L., Rivera Caicedo, J., Moreno, J., & Camps-Valls, G. (2012). Gaussian Process Retrieval of Chlorophyll Content From Imaging Spectroscopy. *Gaussian Process Retrieval of Chlorophyll Content From Imaging Spectroscopy Data*.
- Weiskittel, A. R., Hann, D. W., Kershaw, J. A., & Vanclay, J. K. (2011). *Forest growth and yield modeling*. Wiley-Blackwell.
- Witten, I. H. (2016). *Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques*.

- Wolch, J.R., Byrne, J., & Newell, J.P. (2014). Urban green space, public health, and environmental justice: The challenge of making cities 'just green enough'. . *Landscape and Urban Planning*, 125, 234-244.
- Wulder, M. A., & Franklin, S. E. (2007). *Understanding forest disturbance and spatial pattern: Remote sensing and GIS approaches* (Vol. 1). New York: CRC Press.
doi:https://www.routledge.com/Understanding-Forest-Disturbance-and-Spatial-Pattern-Remote-Sensing-and/Wulder-Franklin/p/book/9780367577834?srsId=AfmBOooqPHfnOBcU73_HXRpIpq74X-Z6_ILoPrVDQ9Lkx8eCMEwcXEBc