

Metodologías basadas en GIS para el diseño de generadores de energía de biomasa urbana

Informe Ejecutivo - IDECA

Yessica Vanessa Trujillo Ladino

Javier Alveiro Rosero Garcia

Juan Carlos Galvis Arrieta

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Bogotá, Colombia
Diciembre, 2025

Resumen

Este proyecto desarrolla una metodología geoespacial y de optimización para identificar zonas óptimas de ubicación de microplantas de biogás a partir de residuos de poda urbana en Bogotá. Mediante la integración de datos oficiales de IDECA y entidades distritales, se cuantifica la oferta de biomasa, se estiman sus posibilidades de valorización energética y se aplican dos modelos de localización (Weber y AHP) con el fin de comparar y validar la robustez de las alternativas propuestas. El proyecto contribuye a la reducción de residuos enviados al relleno sanitario Doña Juana, disminución de emisiones asociadas al transporte y fortalecimiento de alternativas energéticas distribuidas, con potencial aplicación en colegios distritales.

Palabras clave: Biomasa urbana; Digestión anaerobia; Residuos de poda; Biogás; Sistemas de Información Geográfica (SIG); Localización de instalaciones; Optimización espacial.

Índice

1. Introducción **5**

2. Objetivos **6**

3. Alcance **7**

4. Metodología **8**

4.1. Fuentes de datos y preprocesamiento 8

4.2. Filtro ambiental de colegios y construcción de nodos de demanda 10

4.3. Modelo de Weber para ubicación continua 11

4.4. Análisis multicriterio AHP a escala de localidades 13

5. Beneficios **16**

6. Logros **17**

7. Conclusiones y Recomendaciones **18**

Índice de figuras

1. Áreas de servicio Exclusivo: localidad, prestador. Imagen tomada de Subdirección de Recolección Barrido y Limpieza- UAESP –agosto 2020. 8
2. Colegios distritales de Bogotá utilizados en el análisis de localización de generadores urbanos de biomasa. Cada punto representa la ubicación geográfica de un colegio oficial; en rojo se muestran los colegios que se encuentran dentro de zonas de exclusión ambiental y en azul los colegios candidatos que permanecen como alternativas viables. La clasificación se obtuvo mediante un cruce SIG entre las coordenadas de los colegios y las capas de restricciones ambientales consideradas en el estudio. El código y el cuaderno que generan esta figura y la selección de colegios se encuentran documentados en el repositorio [14], lo que permite reproducir y adaptar el procedimiento. 11
3. Resultado del modelo de Weber para la localización continua de un generador urbano de biomasa. El punto de Weber (en amarillo) representa la ubicación óptima obtenida a partir de la distribución espacial de los colegios distritales candidatos y de sus pesos asociados, mostrados junto con los límites de las localidades de Bogotá. El modelo se resolvió mediante técnicas de optimización espacial sobre un sistema de información geográfica. El código y el cuaderno que generan esta figura y la solución del modelo de Weber se encuentran documentados en el repositorio [14], lo que permite reproducir y adaptar el procedimiento. 13
4. Resultados del análisis AHP aplicado a las localidades de Bogotá. El mapa muestra el valor del índice *score_AHP* por localidad, donde colores más intensos indican mayor prioridad relativa para la ubicación de microplantas de biogás, de acuerdo con los criterios definidos en la metodología (disponibilidad potencial de biomasa, condiciones de infraestructura, restricciones ambientales, entre otros). El índice *score_AHP* se obtuvo a partir de la normalización de las variables de entrada, la construcción de matrices de comparación por pares y el cálculo de pesos mediante el método AHP. El código y el cuaderno que generan este mapa y el cálculo del índice *score_AHP* se encuentran documentados en el repositorio [14], lo que permite reproducir y adaptar el procedimiento. 15

1. Introducción

La gestión de los residuos sólidos urbanos es uno de los desafíos ambientales más relevantes para las ciudades contemporáneas. A nivel global, la generación de residuos sigue en aumento, superando los 2000 millones de toneladas anuales y con proyecciones cercanas a 3800 millones de toneladas para 2050 [16]. En muchos países, la disposición en rellenos sanitarios continúa siendo la estrategia predominante, a pesar de generar impactos ambientales significativos, entre ellos la emisión de metano, un gas con alto potencial de calentamiento global [8, 9]. En América Latina, la fracción orgánica de los residuos alcanza cerca del 50 %, lo que representa una oportunidad para procesos de valorización energética mediante tecnologías como la digestión anaerobia [17].

En Colombia, la situación es similar: la dependencia de los rellenos sanitarios, sumada a la alta proporción de residuos orgánicos, incrementa las emisiones y genera presiones sobre la infraestructura existente [4]. En Bogotá, el manejo de residuos sólidos enfrenta retos ambientales, logísticos y sociales cada vez más complejos. Un caso particular son los residuos de poda urbana, un flujo relativamente estable y homogéneo asociado al mantenimiento del arbolado de la ciudad. Se estima que Bogotá produce aproximadamente 459 toneladas de residuos de poda al mes [15], los cuales son enviados directamente al relleno sanitario Doña Juana debido a la ausencia de patios de acopio y de infraestructura distrital destinada a su aprovechamiento, según lo señalado por LIME en un radicado remitido a nuestro equipo.

La literatura ha identificado que los residuos de poda presentan un alto potencial para la producción de biogás y otros productos valorizables [6, 10, 13]. Su composición físico-química, relativamente constante y con bajos niveles de impropios, los convierte en un insumo adecuado para procesos de digestión anaerobia. Sin embargo, la implementación de soluciones bioenergéticas en contextos urbanos exige resolver preguntas fundamentales: ¿dónde ubicar la infraestructura?, ¿cómo varía la oferta territorial disponible?, ¿qué restricciones ambientales o normativas limitan la instalación?, y ¿cómo minimizar los costos logísticos asociados al transporte de biomasa?

En este contexto, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se consolidan como herramientas clave para integrar datos espaciales, criterios ambientales y variables logísticas en procesos de planificación territorial [7, 11, 12]. Complementariamente, los modelos de localización—tanto basados en distancias como en análisis multicriterio—permiten evaluar alternativas óptimas para el emplazamiento de sistemas de generación de bioenergía en entornos urbanos [2, 5].

Este proyecto desarrolla un enfoque sistemático basado en SIG y modelos de localización con el fin de generar escenarios de optimización que permitan identificar sitios viables para la instalación de una microplanta de biogás a partir de residuos de poda urbana en Bogotá. El objetivo general es construir una metodología que articule datos oficiales del distrito, criterios logísticos, restricciones ambientales y modelos matemáticos, ofreciendo una herramienta que aporte a la transición energética y a los objetivos de economía circular de la ciudad.

2. Objetivos

Desarrollar una metodología geoespacial y de optimización para localizar microplantas de biogás a partir de podas urbanas en Bogotá, orientadas a abastecer la demanda energética de colegios distritales y a reducir los residuos y emisiones asociados a su disposición final. El proyecto integra análisis SIG, caracterización territorial de biomasa, modelos de localización y evaluación de usos comunitarios del biogás en el marco de la economía circular distrital.

- Construir y depurar una base de datos geoespacial confiable a partir de información oficial suministrada por IDECA y otras entidades distritales.
- Cuantificar y caracterizar espacialmente la biomasa urbana procedente de podas por zona operativa de aseo, identificando su disponibilidad real y su distribución territorial.
- Estimar el potencial energético del material de poda, incluyendo la producción esperada de biogás y su conversión en electricidad y calor útil bajo distintos supuestos técnicos.
- Identificar zonas idóneas para la instalación de microplantas de biogás mediante análisis espaciales (restricciones ambientales y de riesgo) y modelos de localización basados en criterios logísticos y territoriales.
- Proponer alternativas comunitarias y educativas para el uso del biogás en colegios distritales, evaluando su aporte potencial a la reducción de residuos y emisiones en el Distrito.

3. Alcance

El proyecto se orienta al diseño y validación de una metodología integral para la localización óptima de microplantas de biogás a partir de los residuos de poda del arbolado urbano en Bogotá. Este esfuerzo se concentra exclusivamente en la corriente de podas, entendida como un flujo orgánico relativamente limpio, homogéneo y con un potencial energético significativo, lo que la convierte en una alternativa especialmente adecuada para procesos de valorización como la digestión anaerobia. En consecuencia, el proyecto pone el énfasis en la planificación espacial y en el análisis territorial, más que en el diseño específico de infraestructura o equipamiento.

El alcance geográfico se circunscribe al territorio urbano de Bogotá D.C., empleando el polígono oficial de la ciudad como marco espacial. Las decisiones de localización se abordan desde dos perspectivas metodológicas complementarias: por un lado, un enfoque continuo basado en el modelo de Weber [11], que permite identificar el punto geométricamente óptimo en función de la distribución de la demanda; y por otro, un enfoque discreto sustentado en el análisis multicriterio AHP [3], que incorpora criterios ambientales, territoriales y de accesibilidad para priorizar zonas viables a escala de localidad. Ambos análisis se apoyan en información geoespacial oficial —vectorial y ráster— estandarizada dentro de un mismo sistema de referencia.

La estimación de la oferta de poda se construyó a partir de datos oficiales de residuos correspondientes al período de octubre de 2025, lo que permitió obtener un valor promedio mensual representativo. La metodología desarrollada es, por tanto, replicable y actualizable conforme se disponga de nueva información por parte de las entidades distritales.

Metodológicamente, el proyecto abarca todo el flujo técnico necesario para un análisis espacial: recopilación de datos institucionales, procesos de limpieza y depuración, georreferenciación, generación de capas derivadas y modelación dentro de un entorno SIG. Sobre esta base, se implementaron dos modelos de localización independientes: el algoritmo de Weiszfeld asociado al modelo de Weber [11], y un sistema de evaluación multicriterio AHP diseñado para integrar criterios de riesgo ambiental, accesibilidad territorial y distribución de la demanda educativa [3]. La ejecución independiente de ambos modelos hace posible una comparación posterior de resultados y una evaluación de su coherencia espacial.

Desde la perspectiva institucional, el proyecto tiene un alcance demostrativo y metodológico. No incluye tareas propias de fases posteriores de implementación, tales como licenciamiento ambiental, análisis financiero detallado, estudios de impacto o coordinación operativa con prestadores de servicios de aseo. No obstante, se plantea una articulación conceptual con entidades como IDECA, la UAESP, la Secretaría de Educación y la Secretaría de Planeación, que podrían asumir, ampliar o adaptar la metodología en escenarios futuros de planificación e inversión pública. Al mismo tiempo, el proyecto delimita con claridad las tareas no incluidas, evitando interpretaciones que excedan el propósito metodológico previsto.

4. Metodología

La metodología desarrollada en este trabajo articula herramientas de análisis geoespacial con modelos de localización y evaluación multicriterio, con el fin de identificar zonas óptimas para la instalación de microplantas de digestión anaerobia que aprovechen los residuos de poda urbana en Bogotá. En una primera fase, se integran y depuran fuentes de información oficiales sobre el servicio de aseo, el arbolado urbano, la localización de colegios distritales y las condiciones de amenaza y restricción ambiental. A partir de esta base de datos unificada se caracterizan los flujos de residuos de corte de césped y poda de árboles por Área de Servicio Exclusivo (ASE), y se construye una aproximación al potencial de biomasa aprovechable.
Posteriormente, se definen los nodos de demanda a partir de la matrícula oficial de los colegios, y se aplica un filtro ambiental para excluir aquellos ubicados en zonas de riesgo o cercanas a rondas hídricas y cuerpos de agua. Sobre el subconjunto de colegios candidatos se implementan dos enfoques de localización complementarios: un modelo de Weber (mediana geométrica ponderada) que proporciona una solución continua basada únicamente en distancias y pesos de demanda, y un análisis jerárquico analítico (AHP) a escala de localidad que incorpora criterios de proximidad, seguridad ambiental y coherencia con la organización operativa de las ASE. La combinación de estos resultados permite proponer zonas prioritarias de intervención y generar insumos para el diseño de pilotos de valorización energética de la poda urbana.

4.1. Fuentes de datos y preprocesamiento

La Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos (UAESP) coordina y supervisa en Bogotá la prestación del servicio de poda y manejo del arbolado en el espacio público dentro del esquema de aseo del Distrito. Para efectos operativos y de control, la ciudad se organiza en *Áreas de Servicio Exclusivo* (ASE), cada una atendida por un prestador que concentra las actividades en un ámbito territorial definido por localidades. El mapa siguiente ilustra esta partición por localidad y prestador.



Figura 1: Áreas de servicio Exclusivo: localidad, prestador. Imagen tomada de Subdirección de Recolección Barrido y Limpieza- UAESP –agosto 2020.

El análisis se basa en la integración de información espacial y tabular proveniente de los siguientes archivos, tomados de [1]:

- `Bogota.gpkg`: límite urbano y subdivisión por localidades de Bogotá D.C.
- `Colegios.gpkg`: localización de colegios distritales.
- `Matricula.gpkg`: matrícula oficial, incluyendo la columna `TMATRIC_GE` con el número de estudiantes por sede.
- `data-set-octubre-2025.xlsx`: toneladas mensuales de residuos de corte de césped y poda de árboles por ASE (1–5) y operador.
- `amenaza_mm.gpkg`: amenaza por movimientos en masa.
- `amenaza_in_desbordamiento.gpkg`: amenaza de inundación por desbordamiento.
- `sistemahidrico.gpkg`: sistema hídrico del POT.
- `ronda_hidraulica.gpkg`: rondas hidráulicas asociadas a canales y corrientes superficiales.

Todos los GeoPackage se reproyectan al sistema de referencia EPSG:3116, que es el estándar para análisis espaciales en Bogotá. La capa de colegios se une con la tabla de matrícula usando las llaves `NOMBRE_EST` y `NOMBRE_SED`; de esta unión se deriva la demanda de cada colegio i como:

$$\text{demanda}_i = \begin{cases} \texttt{TMATRIC_GE}_i, & \text{si el dato está disponible,} \\ 1, & \text{en ausencia de información de matrícula.} \end{cases}$$

Las coordenadas proyectadas (x_i, y_i) se extraen de la geometría de cada punto y se emplean en los modelos de localización.
Los datos con los que trabajaremos del data set de los residuos de cesped y poda de arboles son los presentados en la tabla 1.

Año/Mes Formato (dd-mmm-yy)	ASE y Concesionario	Residuos de Recogidos de Corte Césped (t/-mes)	Residuos de Recogidos de Poda Árboles (t/-mes)
oct-25	ASE 1 Promoambiental	233,42	95,63
oct-25	ASE 2 LIME S.A E.S.P	273,21	93,63
oct-25	ASE 3 CIUDAD LIMPIA	147,74	92,13
oct-25	ASE 4 BOGOTÁ LIMPIA	139,58	89,06
oct-25	ASE 5 ÁREA LIMPIA	126,46	88,84
Total Toneladas (t/mes)		920,41	459,29

Cuadro 1: Residuos de corte césped y poda de árboles (RBL) por ASE. Tomado de [15].

4.2. Filtro ambiental de colegios y construcción de nodos de demanda

Las capas de amenaza y de sistema hídrico se utilizan para definir zonas de exclusión donde no se considera conveniente localizar infraestructura nueva ni utilizar colegios como nodos de demanda. Para cada colegio se verifica la intersección con las capas de amenaza por movimientos en masa, amenaza de inundación por desbordamiento, sistema hídrico del POT y ronda hidráulica.

A partir de las uniones espaciales se construyen banderas booleanas (`in_amenaza_mm`, `in_amenaza_inun`, `in_sist_hidrico`, `in_ronda_hid`) y un indicador agregado:

$$\texttt{en_zona_exclusion}_i = \texttt{in_amenaza_mm}_i \vee \texttt{in_amenaza_inun}_i \vee \texttt{in_sist_hidrico}_i \vee \texttt{in_ronda_hid}_i.$$

Los colegios con $\texttt{en_zona_exclusion}_i = 1$ se descartan de los modelos de localización y se trabaja únicamente con el subconjunto de *colegios candidatos* (seguros) con demanda positiva, estos son los presentados en la Figura 2.

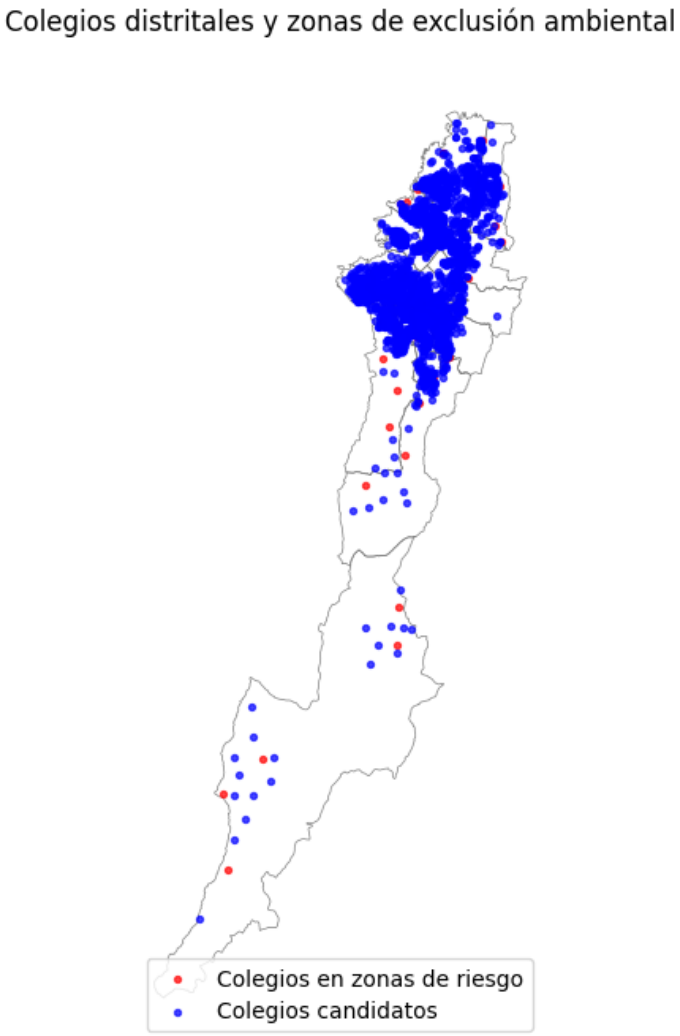


Figura 2: Colegios distritales de Bogotá utilizados en el análisis de localización de generadores urbanos de biomasa. Cada punto representa la ubicación geográfica de un colegio oficial; en rojo se muestran los colegios que se encuentran dentro de zonas de exclusión ambiental y en azul los colegios candidatos que permanecen como alternativas viables. La clasificación se obtuvo mediante un cruce SIG entre las coordenadas de los colegios y las capas de restricciones ambientales consideradas en el estudio. El código y el cuaderno que generan esta figura y la selección de colegios se encuentran documentados en el repositorio [14], lo que permite reproducir y adaptar el procedimiento.

Este subconjunto constituye el conjunto de nodos de demanda $\mathcal{I}$ utilizado tanto en el modelo de Weber como en el AHP.

4.3. Modelo de Weber para ubicación continua

El modelo de Weber se emplea para identificar un punto continuo (x, y) del plano que minimiza la distancia total ponderada por la demanda entre una microplanta hipotética y los colegios candidatos. Sea:

- $\mathcal{I}$: conjunto de colegios candidatos,

- (x_i, y_i): coordenadas proyectadas del colegio i,
- w_i: demanda asociada al colegio i (número de estudiantes).

La función objetivo es la *mediana geométrica ponderada*:

$$\min_{(x,y)\in\mathbb{R}^2} F(x,y) = \sum_{i\in\mathcal{I}} w_i\, d_i(x,y), \qquad d_i(x,y) = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}. \tag{1}$$

Dado que el problema no tiene solución cerrada, se utiliza el algoritmo de Weiszfeld. Partiendo del centroide ponderado

$$x^{(0)} = \frac{\sum_i w_i x_i}{\sum_i w_i}, \qquad y^{(0)} = \frac{\sum_i w_i y_i}{\sum_i w_i},$$

se actualiza iterativamente:

$$(x^{(k+1)}, y^{(k+1)}) = \frac{\displaystyle\sum_{i\in\mathcal{I}} \frac{w_i}{d_i^{(k)}}(x_i, y_i)}{\displaystyle\sum_{i\in\mathcal{I}} \frac{w_i}{d_i^{(k)}}}, \qquad d_i^{(k)} = \sqrt{(x^{(k)}-x_i)^2 + (y^{(k)}-y_i)^2}, \tag{2}$$

hasta que la diferencia entre iteraciones satisface

$$\sqrt{(x^{(k+1)} - x^{(k)})^2 + (y^{(k+1)} - y^{(k)})^2} < \varepsilon.$$

En caso de que $(x^{(k)}, y^{(k)})$ coincida numéricamente con la posición de un colegio, el algoritmo se detiene y ese punto se adopta como solución. El resultado (x^*, y^*) se representa sobre el territorio distrital junto con los colegios candidatos en la Figura 3.

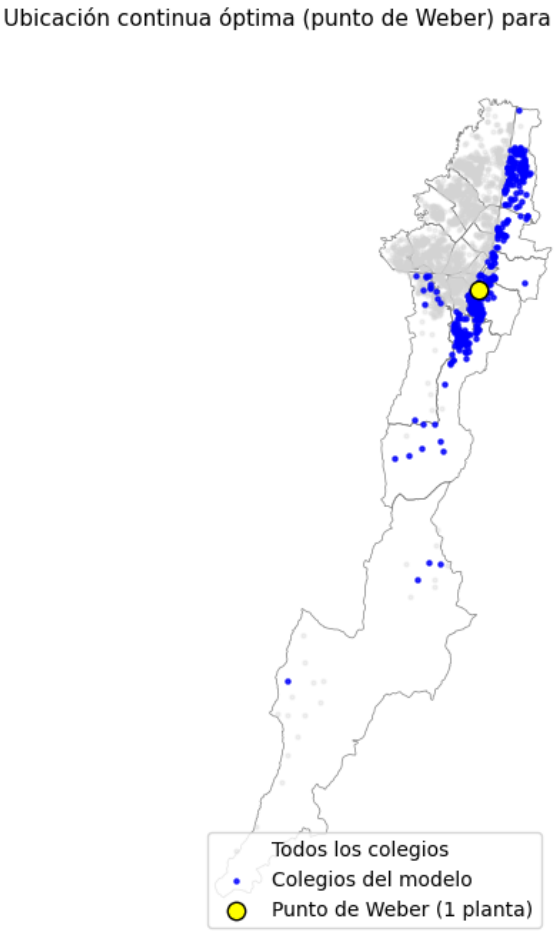


Figura 3: Resultado del modelo de Weber para la localización continua de un generador urbano de biomasa. El punto de Weber (en amarillo) representa la ubicación óptima obtenida a partir de la distribución espacial de los colegios distritales candidatos y de sus pesos asociados, mostrados junto con los límites de las localidades de Bogotá. El modelo se resolvió mediante técnicas de optimización espacial sobre un sistema de información geográfica. El código y el cuaderno que generan esta figura y la solución del modelo de Weber se encuentran documentados en el repositorio [14], lo que permite reproducir y adaptar el procedimiento.

4.4. Análisis multicriterio AHP a escala de localidades

Para incorporar explícitamente criterios de planificación territorial y restricciones ambientales, se desarrolla un análisis multicriterio mediante el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) sobre el conjunto de localidades $\mathcal{K}$ derivado de `Bogota.gpkg`. Cada localidad se evalúa según dos criterios principales:

1. **Proximidad a colegios** (C_1): se utiliza el centroide geométrico de la localidad k y se calcula la distancia media ponderada por la matrícula a los colegios candidatos:

$$\text{dist_media}_k = \frac{\sum_{i \in \mathcal{I}} w_i \, d_{ik}}{\sum_{i \in \mathcal{I}} w_i},$$

donde d_{ik} es la distancia entre el centroide de k y el colegio i.

2. **Seguridad ambiental** (C_2): para cada localidad se contabiliza el número de intersecciones con las capas `amenaza_mm.gpkg`, `amenaza_in_desbordamiento.gpkg`, `sistemahidrico.gpkg` y `ronda_hidraulica.gpkg`. A partir de ese conteo se define un índice de seguridad:

$$\text{seguridad}_k = 1 - \frac{\text{n_riesgos}_k}{\text{máx}_{k' \in \mathcal{K}} \, \text{n_riesgos}_{k'}},$$

de manera que valores cercanos a 1 indican localidades sin o con pocas restricciones ambientales.

Ambos criterios se normalizan en el intervalo $[0, 1]$ para obtener score_distancia_k (1 = localidad más cercana a los colegios) y score_seguridad_k (1 = localidad más segura ambientalmente). La importancia relativa entre C_1 y C_2 se define mediante una matriz de comparación por pares 2×2, siguiendo la escala de Saaty. En este estudio se considera que la proximidad a colegios es moderadamente más importante que la seguridad ambiental, asignando el valor 3 en la comparación C_1 frente a C_2.

El vector propio principal de la matriz de comparación proporciona los pesos w_{dist} y w_{seg}, y se verifica que la razón de consistencia (CR) sea adecuada (CR $<$ 0,1). El índice sintético AHP para cada localidad se calcula como:

$$\text{score_AHP}_k = w_{\text{dist}} \cdot \text{score_distancia}_k + w_{\text{seg}} \cdot \text{score_seguridad}_k. \tag{3}$$

El ranking de localidades obtenido a partir de (3) se interpreta junto con la distribución de residuos por ASE (Tabla 1) para identificar aquellas localidades que, además de ser cercanas a la demanda y ambientalmente seguras, se encuentran en zonas operadas por concesionarios con mayor oferta de biomasa. Ver Figura 4.

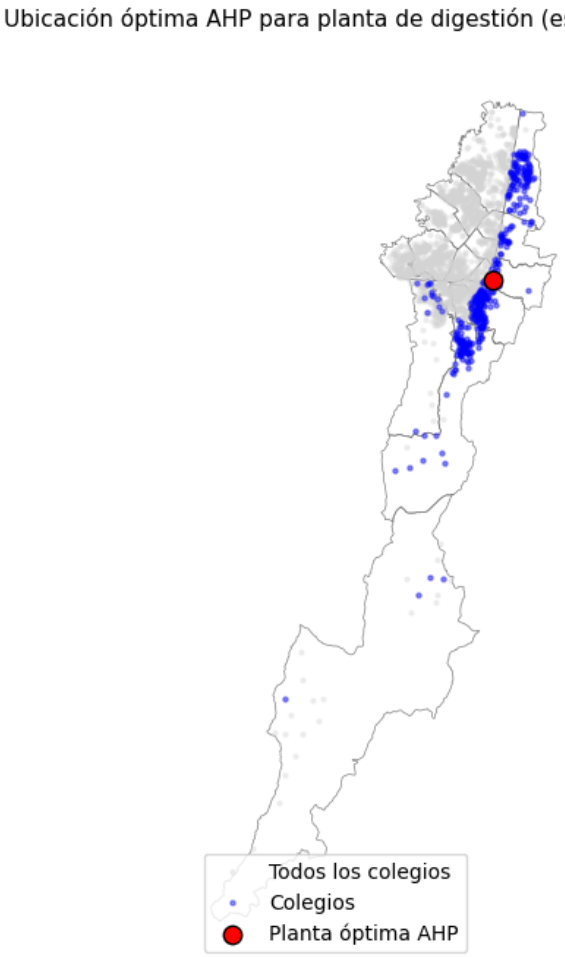


Figura 4: Resultados del análisis AHP aplicado a las localidades de Bogotá. El mapa muestra el valor del índice *score_AHP* por localidad, donde colores más intensos indican mayor prioridad relativa para la ubicación de microplantas de biogás, de acuerdo con los criterios definidos en la metodología (disponibilidad potencial de biomasa, condiciones de infraestructura, restricciones ambientales, entre otros). El índice *score_AHP* se obtuvo a partir de la normalización de las variables de entrada, la construcción de matrices de comparación por pares y el cálculo de pesos mediante el método AHP. El código y el cuaderno que generan este mapa y el cálculo del índice *score_AHP* se encuentran documentados en el repositorio [14], lo que permite reproducir y adaptar el procedimiento.

5. Beneficios

El proyecto generaría beneficios directos para la ciudad de Bogotá al aportar una metodología concreta para aprovechar los residuos de poda urbana como fuente de energía renovable. Al identificar opciones para valorizar estos residuos mediante digestión anaerobia, se reduce la presión sobre el relleno sanitario Doña Juana, se disminuyen las emisiones asociadas al transporte y a la disposición final, y se avanza hacia un modelo de economía circular. Este enfoque es coherente con el Plan de Desarrollo Distrital, que promueve el uso eficiente de los recursos, la gestión sostenible de los residuos y la adopción de soluciones energéticas con bajas emisiones de carbono.

En particular, trabajar con podas urbanas resulta estratégico por varias razones. En ausencia de patios de acopio distritales, los residuos de poda se envían casi de manera directa al relleno sanitario Doña Juana, con un flujo estimado de alrededor de 459 t/mes. Se trata de una corriente relativamente constante, ligada al mantenimiento rutinario del arbolado urbano, y además es una fracción comparativamente limpia y homogénea frente a otros residuos urbanos mezclados, lo que facilita su separación, acondicionamiento y pretratamiento. Estas características convierten a la poda urbana en una candidata idónea para procesos de valorización energética en forma de biogás, en lugar de una disposición final sin aprovechamiento, y abren una oportunidad concreta para reducir tanto los volúmenes dispuestos como las emisiones asociadas al transporte y a la operación del relleno sanitario.

Los habitantes de Bogotá también se benefician de una gestión más eficiente de los residuos de poda. La valorización energética evita que grandes volúmenes de biomasa se dispongan directamente en el relleno sanitario, reduce emisiones derivadas de la descomposición no controlada y contribuye a mejorar la calidad ambiental del entorno urbano. Al mismo tiempo, la producción local de biogás abre oportunidades para abastecer energéticamente equipamientos públicos como colegios, sedes administrativas y centros comunitarios, lo que puede traducirse en menores costos operativos y en el fortalecimiento de los programas institucionales de eficiencia energética.

La implementación de la metodología propuesta también genera beneficios específicos para las entidades distritales encargadas de la gestión de la información y la toma de decisiones. Para IDECA, el proyecto evidencia el valor estratégico de la infraestructura de datos geoespaciales como soporte para el análisis de problemáticas ambientales complejas y la articulación interinstitucional. Para la UAESP y las empresas de aseo, proporciona herramientas cuantitativas para optimizar rutas de recolección, identificar microhubs de valorización y mejorar la eficiencia operativa del sistema de residuos. Por su parte, la Secretaría Distrital de Ambiente y la Secretaría Distrital de Planeación pueden integrar estos resultados en la gestión del arbolado urbano, la formulación de instrumentos normativos y la evaluación ambiental estratégica de proyectos de infraestructura verde y de bioenergía.

6. Logros

El proyecto alcanzó avances significativos en la construcción de una metodología replicable para la planificación urbana basada en el aprovechamiento de la biomasa. Uno de los principales logros fue el desarrollo de un enfoque espacial robusto que integra información oficial de IDECA con modelos cuantitativos y criterios ambientales, permitiendo por primera vez en Bogotá una identificación objetiva de zonas óptimas para la instalación de microplantas de digestión anaerobia. Esta integración entre SIG y modelación energética constituye un aporte metodológico relevante y adaptable a otros flujos de residuos urbanos.

Otro logro importante fue la consolidación de un inventario espacial multi-fuente que reúne datos del arbolado urbano, redes viales, restricciones ambientales, colegios distritales y estadísticas reales de recolección. La estandarización de estas capas dentro de un único modelo geoespacial facilita la toma de decisiones y reduce la fragmentación institucional de la información. Como resultado, el proyecto establece una base de datos operativa que puede ser actualizada y utilizada por las entidades distritales para planeación y gestión ambiental.

Asimismo, se desarrollaron dos modelos independientes de localización —el método de Weber y un análisis multicriterio basado en AHP— lo que permitió comparar enfoques logísticos y ambientales. La convergencia de ambos métodos en una misma zona prioritaria constituye un hallazgo sólido, que valida la consistencia territorial de los resultados y su aplicabilidad para una implementación real. Este ejercicio metodológico demuestra que la planeación de bioenergía urbana puede beneficiarse de la triangulación entre modelos analíticos, criterios ambientales y datos operativos.

Finalmente, se obtuvo una estimación confiable de la oferta mensual de poda aprovechable en Bogotá, del orden de 1379 t/mes de residuo fresco, de las cuales cerca del 90 % corresponde a fracción orgánica biodegradable (aproximadamente 1240 t/mes), considerando además un rango de incertidumbre entre 85 % y 95 % para dicha fracción. De esta manera se cuantifica, por primera vez con este nivel de detalle, un flujo de biomasa que hasta ahora no había sido evaluado sistemáticamente para fines energéticos. La identificación del problema, la disposición directa de estos residuos en el relleno sanitario Doña Juana, y la construcción de escenarios de valorización energética evidencian oportunidades tangibles para reducir emisiones, optimizar rutas de recolección y generar energía renovable en equipamientos públicos. En conjunto, estos resultados ofrecen insumos accionables para futuros pilotos de bioenergía y para el fortalecimiento de las políticas distritales de economía circular.

7. Conclusiones y Recomendaciones

El proyecto, actualmente en fase de incubación, demuestra que Bogotá cuenta con el potencial técnico y territorial necesario para implementar soluciones de bioenergía basadas en los residuos de poda urbana. La integración de datos geoespaciales oficiales con modelos de análisis logístico y multicriterio permitió identificar zonas óptimas para la instalación de microplantas de digestión anaerobia, mostrando que la ciudad puede avanzar hacia esquemas descentralizados de valorización energética.

Finalmente, se obtuvo una estimación confiable de la oferta mensual de poda aprovechable en Bogotá, del orden de 1379 t/mes de residuo fresco, de las cuales cerca del 90 % corresponde a fracción orgánica biodegradable (aproximadamente 1240 t/mes), considerando además un rango de incertidumbre entre 85 % y 95 % para dicha fracción. De esta manera se cuantifica, por primera vez con este nivel de detalle, un flujo de biomasa que hasta ahora no había sido evaluado sistemáticamente para fines energéticos. Como referencia conservadora, la información oficial indica que al menos 459 t/mes de residuos de poda se envían actualmente al relleno sanitario Doña Juana, lo cual confirma que estos flujos, altamente aprovechables desde el punto de vista energético, representan una oportunidad hoy desaprovechada para generar energía renovable, reducir emisiones y mejorar la eficiencia del sistema de aseo.

El uso complementario del método de Weber y del análisis AHP permitió obtener resultados consistentes desde perspectivas diferentes. Mientras que el modelo de Weber optimiza exclusivamente distancias y pesos asociados a la demanda (matrícula de los colegios), el enfoque AHP incorpora además factores ambientales, de seguridad territorial y criterios normativos. La convergencia de ambos métodos en una misma zona prioritaria refuerza la validez de la metodología y da soporte a una propuesta de localización robusta, con fundamentos suficientes para avanzar hacia pruebas de campo. Adicionalmente, el proyecto consolidó un repositorio geoespacial organizado que facilita la interoperabilidad entre entidades distritales y sienta una base metodológica replicable para futuras evaluaciones de biomasa urbana.

En conjunto, los resultados confirman que el aprovechamiento energético de la poda urbana no solo es técnicamente viable, sino también estratégico para Bogotá. Aunque se trata de un proyecto en incubación, la metodología desarrollada ofrece un esquema claro para implementar de manera óptima microplantas de biogás en el territorio distrital, siempre que se cuente con información operacional refinada y con los arreglos institucionales necesarios. De este modo, el trabajo aporta una herramienta concreta para mejorar la planeación territorial, avanzar hacia la economía circular y fortalecer la resiliencia energética de equipamientos públicos.

Se recomienda avanzar hacia una fase piloto en la zona prioritaria identificada por ambos métodos (Weber y AHP), desarrollando estudios de prefactibilidad técnica y económica que incluyan: (i) caracterización físico–química real de los residuos de poda (TS, SV, potencial metanogénico y fracción de impropios), (ii) evaluación comparativa de tecnologías de digestión anaerobia adecuadas para microescala urbana, y (iii) estimación detallada de costos de inversión, operación y mantenimiento. La instalación de un piloto permitiría validar los supuestos del modelo, identificar desafíos logísticos (acopio, pretratamiento, transporte) y cuantificar el impacto energético

y ambiental bajo condiciones reales, facilitando el paso de un proyecto incubado a una implementación a escala operativa.
Asimismo, es fundamental mejorar la calidad y disponibilidad de los datos operativos, particularmente en lo referente a la estacionalidad de las podas, los volúmenes por cuadrante u operativo de aseo, la composición físico–química del material vegetal y la localización efectiva de patios de acopio o puntos de transferencia. Una mayor precisión en estas variables permitirá construir escenarios dinámicos más confiables y ajustar los modelos de localización a condiciones reales de operación, haciendo posible una implementación óptima de la infraestructura propuesta.
Desde una perspectiva institucional, se recomienda promover una articulación intersectorial entre IDECA, la UAESP, la Secretaría Distrital de Ambiente, la Secretaría Distrital de Planeación y las empresas de aseo, con el fin de consolidar rutas de valorización que integren la logística existente y la infraestructura de datos geoespaciales. La vinculación de instituciones educativas cercanas a los puntos candidatos representa, además, una oportunidad para implementar proyectos de autoconsumo energético en colegios distritales y fortalecer la educación ambiental en torno a la gestión de residuos y la bioenergía.

Adicionalmente, es importante señalar que, en la fase de formulación, se contempló ampliar el alcance del proyecto para incluir otros flujos de biomasa urbana, en particular los residuos orgánicos generados en colegios distritales a partir del Programa de Alimentación Escolar (PAE) y los residuos orgánicos provenientes de plazas de mercado. Sin embargo, no se contó con información suficiente, homogénea y sistemática sobre volúmenes, composición y localización detallada de estos flujos, lo que impidió incorporarlos de manera robusta en los modelos de localización y en los escenarios de valorización energética.
Como recomendación específica, se propone que futuras fases del proyecto prioricen el fortalecimiento de los sistemas de información asociados al PAE y a las plazas de mercado, de modo que se disponga de series de datos confiables sobre generación, estacionalidad y rutas de recolección de residuos orgánicos. Contar con estos insumos permitiría integrar dichos flujos en esquemas de codigestión con la poda urbana, mejorar la estabilidad del proceso de digestión anaerobia, incrementar la producción de biogás y avanzar hacia un sistema distrital de bioenergía más diversificado y representativo de la realidad de Bogotá.
En esta misma línea, se sugiere ampliar progresivamente la metodología a otros flujos de biomasa urbana (por ejemplo, residuos de plazas de mercado, residuos orgánicos escolares y otros biorresiduos de origen municipal) y evaluar distintos escenarios de codigestión. Esta expansión permitiría consolidar un sistema distrital de bioenergía de carácter modular y descentralizado, con mayor impacto ambiental y social en el mediano y largo plazo.

Referencias

[1] Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. *Datos Abiertos Bogotá*. Portal distrital de datos abiertos de Bogotá D.C. 2018. URL: https://datosabiertos.bogota.gov.co/ (visitado 09-12-2025).

[2] M. Alherbawi et al. "Multi-Biomass Refinery Siting: A GIS Geospatial Optimization Approach". En: *Chemical Engineering Transactions* 92 (2022), págs. 73-78. DOI: 10.3303/CET2292013. URL: https://www.cetjournal.it/index.php/cet/article/view/CET2292013.

[3] Omar S. Arabeyyat et al. "Landfill Site Selection for Sustainable Solid Waste Management Using Multiple-Criteria Decision-Making: Case Study Al-Balqa Governorate in Jordan". En: *MethodsX* 12 (2024), pág. 102591. DOI: 10.1016/j.mex.2024.102591. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215016124000451.

[4] B. H. Aristizábal et al. "Evaluación de la digestión anaerobia de residuos de poda como alternativa para disminuir emisiones de gases de efecto invernadero". En: *Energética* 46 (2015), págs. 29-36.

[5] M. M. Billal, R. M. Sebastian y A. Kumar. "Developing a GIS-Based MINLP Framework for Optimizing the Waste-to-Energy Supply Chain with Plant Scale Considerations". En: *Journal of Cleaner Production* 490 (2025), pág. 144709.

[6] M. Carvalho et al. "Urban Pruning Waste: Carbon Footprint Associated with Energy Generation and Prospects for Clean Development Mechanisms". En: *Revista Árvore* 43.4 (2019), e430405. DOI: 10.1590/1806-90882019000400005. URL: https://www.scielo.br/j/rarv/a/MvrgD4QHXZfL5stKtrLcrYR/?lang=en.

[7] G. Charis, G. Danha y E. Muzenda. "A Review of the Application of GIS in Biomass and Solid Waste Supply Chain Optimization: Gaps and Opportunities for Developing Nations". En: *Detritus* 6 (2019).

[8] R. Cremiato et al. "Environmental impact of municipal waste management scenarios". En: *Waste Management* 73 (2018), págs. 1-13.

[9] Navarro Ferronato y Vincenzo Torretta. "Waste Mismanagement in Developing Countries: A Review of Global Issues". En: *International Journal of Environmental Research and Public Health* 16.6 (2019), pág. 1060. DOI: 10.3390/ijerph16061060. URL: https://www.mdpi.com/1660-4601/16/6/1060.

[10] S. Hagel et al. "Valorization of Urban Street Tree Pruning Residues in Biorefineries by Steam Refining: Conversion Into Fibers, Emulsifiers, and Biogas". En: *Frontiers in Chemistry* 9 (2021), pág. 779609. DOI: 10.3389/fchem.2021.779609.

[11] M. A. Hassaan. "A GIS-Based Suitability Analysis for Siting a Solid Waste Incineration Power Plant in an Urban Area: Case Study Alexandria Governorate, Egypt". En: *Journal of Geographic Information System* 7.6 (2015).

[12] S. Lycourghiotis. "GIS and Spatial Analysis in the Utilization of Residual Biomass for Biofuel Production". En: *J* 8.2 (2025), pág. 17. DOI: 10.3390/j8020017. URL: https://www.mdpi.com/2571-8800/8/2/17.

[13] C. Pérez, A. Gómez y L. Rojas. "Ruta de valorización integral de podas urbanas: fibras, azúcares, biogás y compost". En: *Revista de Ingeniería* 54 (2021), págs. 57-69.

[14] Yessica Trujillo. *GIS-based methodologies for the design of urban biomass energy generators*. GitHub repository. 2025. URL: https://github.com/ytrujillol/GIS-based-methodologies-for-the-design-of-urban-biomass-energy-generators (visitado 10-12-2025).

[15] Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos (UAESP). *Datos Residuos Recogidos RBL Octubre 2025. Datos Abiertos Bogotá*. 2025. URL: https://datosabiertos.bogota.gov.co/dataset/datos-residuos-recogidos-rbl-octubre-2025 (visitado 10-2025).

[16] United Nations Environment Programme. *Global Waste Management Outlook 2024*. UNEP, 2024. URL: https://www.unep.org/resources/global-waste-management-outlook-2024.

[17] United Nations Environment Programme. *Waste Management Outlook for Latin America and the Caribbean*. UN Environment Programme, 2018. URL: https://www.unep.org/resources/report/waste-management-outlook-latin-america-and-caribbean.