

Optimization of recycling station siting on a school campus using a mixed multi-criteria approach

Renteria Esteban, José Fernando, Estudiante pregrado ¹, Hortua Giraldo, German David, Estudiante pregrado ², Tarazona Galán, Héctor Orlando, Magister ³, Moreno Osorio, Stevens, Magister ⁴, Reyes Giraldo, Andrés Felipe, Magister ⁵, Arboleda Duque, Andrés Felipe, Magister ⁶ and Jaramillo Caicedo, Leidy Johanna, Magister ⁷

^{1,2,3,4,5} Author's Corporación Universitaria Minuto de Dios, Colombia, jose.renteria@uniminuto.edu.co, german.hortua@uniminuto.edu.co, hector.tarazona@uniminuto.edu, stevens.moreno@uniminuto.edu, andres.reyes.g@uniminuto.edu

⁶ Author's Universidad Santiago de Cali, Colombia, dirtecdesis@usc.edu.co

⁷ Author's Universidad San Buenaventura de Cali, Colombia, dirtecdesis@usc.edu.co

Abstract– *This research proposes a relocation plan for source-separation stations (ecological points) on a 95,000 m² school campus, considering operational constraints along with social, environmental, and service factors. A mixed multi-criteria location method is adapted, integrating objective factors (collection distances/costs) and subjective factors (coverage, pedestrian traffic type, soil condition, and visibility). The campus is segmented into five functional zones; for each zone, candidate locations are evaluated, and a location preference measure is calculated to select the final set. The result is a network of 23 stations distributed to enhance accessibility, reduce collection routes, and support environmental education and source-separation strategies. Implications for educational institutions in similar contexts are discussed, and future validation lines based on measurements of recyclables capture and contamination are proposed.*

Keywords– *Solid waste management, Source separation, Facility location, Multi-criteria decision-making (MCDM), Sustainable campus.*

Optimización de la ubicación de puntos ecológicos en un campus escolar mediante un enfoque multicriterio mixto

Renteria Esteban, José Fernando, Estudiante pregrado¹, Hortua Giraldo, German David, Estudiante pregrado², Tarazona Galán, Héctor Orlando, Magister³, Moreno Osorio, Stevens, Magister⁴, Reyes Giraldo, Andrés Felipe, Magister⁵, Arboleda Duque, Andrés Felipe, Magister⁶ and Jaramillo Caicedo, Leidy Johanna, Magister⁷

^{1,2,3,4,5} Author's Corporación Universitaria Minuto de Dios, Colombia, jose.renteria@uniminuto.edu.co, german.hortua@uniminuto.edu.co, hector.tarazona@uniminuto.edu, stevens.moreno@uniminuto.edu, andres.reyes.g@uniminuto.edu

⁶ Author's Universidad Santiago de Cali, Colombia, dirtecdesis@usc.edu.co

⁷ Author's Universidad San Buenaventura de Cali, Colombia, dirtecdesis@usc.edu.co

Resumen— La presente investigación propone un plan de reubicación de estaciones de separación en la fuente (puntos ecológicos) en un campus escolar de 95,000 m², considerando restricciones operativas y factores sociales, ambientales y de servicio. Se adapta un método de localización multicriterio mixto que integra factores objetivos (distancias/costos de recolección) y subjetivos (cobertura, tipo de tránsito, condición del suelo y visibilidad). El campus se segmenta en cinco zonas funcionales; para cada una se evalúan ubicaciones candidatas y se calcula una medida de preferencia de localización para seleccionar el conjunto final. El resultado es una red de 23 estaciones distribuidas para mejorar accesibilidad, reducir recorridos de recolección y apoyar estrategias de educación ambiental y separación en la fuente. Se discuten implicaciones para instituciones educativas en contextos similares y se proponen líneas de validación futura basadas en mediciones de captura y contaminación de reciclables.

Palabras clave— Gestión de residuos sólidos, Separación en la fuente, Localización de instalaciones, Análisis multicriterio (MCDM), Campus sostenible.

I. INTRODUCCIÓN

Las instituciones educativas generan flujos de residuos heterogéneos asociados a actividades académicas, administrativas y de servicios, y su manejo impacta costos, salubridad y desempeño ambiental. En particular, la ubicación inadecuada de puntos de separación en la fuente reduce la tasa de captura de reciclables y aumenta la disposición en mezclado, un efecto ampliamente documentado cuando la infraestructura no acompaña intervenciones educativas o de cambio de comportamiento [1], [2], [3].

En el caso de estudio (Colegio Jefferson, Yumbo, Colombia), se identificaron estaciones existentes sin cumplimiento funcional y con cobertura insuficiente para áreas de alta afluencia, lo que deriva en disposición incorrecta y acumulación en puntos de acopio. La literatura sobre ubicación de contenedores (“waste bins location problema”)

muestra que pequeñas variaciones en la red de contenedores pueden alterar simultáneamente métricas de servicio y costos operativos [4], [5].

El objetivo de este artículo es diseñar y documentar un procedimiento reproducible para optimizar la ubicación de puntos ecológicos en un campus escolar, integrando criterios técnicos y de comportamiento. La contribución principal es un esquema de decisión multicriterio mixto, basado en la adaptación de Brown–Gibson y umbrales por zona, que produce una configuración de estaciones factible y trazable para microentornos (campus) [6], [7]. Adicionalmente, se aporta una discusión comparativa frente a enfoques de localización-asignación y técnicas GIS empleadas en gestión de residuos [8], [9].

II. ESTADO DEL ARTE

En la literatura reciente, la localización de contenedores y puntos de recolección se ha estudiado como un problema de optimización con “trade-offs” entre costo y calidad de servicio (p. ej., distancias caminables, número de puntos, tiempos de recolección), con revisiones que sintetizan criterios, restricciones y métodos exactos/heurísticos [4].

Trabajos aplicados han formulado el problema como ubicación de contenedores con criterios múltiples y restricciones de cobertura y capacidad [5], y han propuesto algoritmos basados en “clustering” para escalabilidad en escenarios urbanos [10]. También se han publicado formulaciones de ubicación-asignación con asignación al contenedor más cercano y restricciones por tipo de residuo, incluyendo contextos rurales [11].

En paralelo, modelos multicriterio híbridos se usan para decisiones de localización en infraestructura de residuos cuando coexisten objetivos ambientales, económicos y sociales [6]. En el plano conductual, evidencia con datos

reales (p. ej., IoT bins) y revisiones sistemáticas muestran brechas entre intención y comportamiento de separación y resaltan la importancia de la conveniencia y señalización, especialmente en poblaciones estudiantiles [12], [1], [13].

De igual forma, estudios de sostenibilidad en campus y de cierre de ciclo reportan que la infraestructura (ubicación, accesibilidad y operación) es un habilitador crítico para planes integrados de gestión [14], [7]. En particular, en instituciones de educación superior se han propuesto flujos y listas de verificación para planes de gestión de residuos, destacando gobernanza, logística interna y educación ambiental como componentes inseparables [15]. Asimismo, análisis empíricos encuentran que la educación ambiental puede incrementar el comportamiento de separación en estudiantes, con efectos heterogéneos según nivel educativo y contexto [16].

III. DESARROLLO

La investigación se desarrolló utilizando una investigación de tipo descriptivo y aplicada ya que buscan especificar las propiedades, las características y perfiles de personas, grupos, comunidades, procesos, objetos y cualquier otro fenómenos que se someta a un análisis, además de ser un enfoque mixto porque considera aspectos cualitativos y cuantitativos que como el trabajo lo muestra nos permite generalizar resultados y profundidad de los datos como contextualización del ambiente o entorno, permitiendo recolectar la información dentro del colegio y basarse en las nuevas normativas, suministrada por el Ministerio de Ambiente en Colombia, con el fin de proponer una mejor ubicación de los puntos ecológicos dentro de las instalaciones del colegio Jefferson ubicado en Yumbo.

A. Contexto y diagnóstico.

Se realizó una visita técnica al campus (aproximadamente 97.000 m²; un promedio de 1,000 visitantes/día), registro fotográfico de estaciones existentes y aplicación de una lista de chequeo para caracterizar estado, tipología, capacidad y señalización. Adicionalmente, se recogieron observaciones del personal de mantenimiento y administración para identificar zonas críticas de generación y dificultades de recolección, siguiendo prácticas de diagnóstico empleadas en estudios de gestión de residuos en instituciones educativas [7].

B. Segmentación espacial y alternativas.

El campus se dividió en cinco zonas funcionales (áreas) para controlar heterogeneidad de flujos y restricciones operativas. En cada zona se definió un conjunto de ubicaciones candidatas (alternativas) considerando accesibilidad, seguridad y disponibilidad física.

C. Modelo multicriterio mixto.

Se adaptó un método de localización que integra: (i) componentes objetivos, asociados a distancias y esfuerzo de recolección; y (ii) componentes subjetivos, evaluados mediante ponderaciones de criterios. Este tipo de combinación es consistente con enfoques multicriterio híbridos usados para decisiones de localización de infraestructura de residuos [6].

Los criterios subjetivos utilizados fueron: cobertura esperada, condición del suelo (estabilidad/instalación), nivel de tráfico/afluencia, tipo de usuarios predominantes y facilidad de recolección para el personal, en línea con determinantes de conveniencia y facilidad de uso discutidos en estudios conductuales [1], [2]. Para cada alternativa se calcula una Medida de Preferencia de Localización (MPL) combinando ambas componentes y se seleccionan las alternativas con mayor MPL por zona, sujetas a cobertura mínima.

D. Implementación y verificación.

Los cálculos se realizaron por zona y se consolidaron en un mapa general. La verificación inicial consistió en revisiones de cobertura visual y accesibilidad, y en validación operativa con el personal de recolección (rutas y puntos de acopio). Este tipo de validación operativa es compatible con estudios que integran optimización de puntos de recolección y consideraciones de ruteo/operación [9], [17].

E. Preguntas de investigación e hipótesis.

PI1: ¿Puede un modelo multicriterio mixto mejorar la cobertura y conveniencia de la infraestructura de separación en la fuente en un campus escolar, manteniendo la factibilidad operativa de recolección?

H1: La reconfiguración obtenida mediante MPL incrementa la adecuación espacial (cobertura/afluencia servida) respecto al estado base, sin introducir ubicaciones no factibles (FC=0).

PI2: ¿La inclusión de criterios subjetivos ligados a operación (acceso y distancia de recolección) y generación (cantidad de residuos) altera el ranking de ubicaciones frente a un enfoque puramente objetivo?

H2: La componente subjetiva (FS), aun con menor peso ($1-\alpha$), modifica el orden relativo de alternativas en al menos una zona, evidenciando la necesidad de integrar factores humanos y operativos.

F. Variables, criterios y métricas.

Se emplearon tres familias de factores (críticos, objetivos y subjetivos) coherentes con la adaptación del método de Brown-Gibson. La Tabla I resume definiciones operacionales, métricas y fuente de obtención.

G. Formalización matemática de la MPL.

Sea i una alternativa (ubicación candidata) en una zona z . El método combina: (1) factores críticos FC_i ; (2) un puntaje objetivo FO_i ; y (3) un puntaje subjetivo FS_i .

1) Factores críticos. Cada subfactor crítico $c \in C$ se evalúa binariamente (0/1). El factor crítico total se define como:

$$FC_i = \prod \{c \in C\} x_{ic}, \text{ donde } x_{ic} \in \{0,1\}.$$

Si algún subfactor es 0, la alternativa queda descartada ($FC_i=0$).

TABLA I
Criterios, definición operacional, métrica y fuente

Criterio	Definición operacional	Métrica / escala	Fuente
FC1: Acceso peatonal (crítico)	La ubicación es alcanzable por circulación peatonal y no presenta barreras físicas inmediatas.	Binaria: 1 (cumple) / 0 (no cumple).	Lista de chequeo + inspección en sitio.
FC2: Reconocimiento del punto (crítico)	El punto es visible y reconocible para usuarios (señalización/ubicación evidente).	Binaria: 1/0.	Lista de chequeo + registro fotográfico.
FC3: Factible (crítico)	Existe espacio y condición física para instalar/operar el punto sin interferir con seguridad/operación.	Binaria: 1/0. $FC = \prod$ subfactores.	Validación con personal de servicios generales.
FO1: Zonas comunes (objetivo)	Afluencia potencial servida en áreas comunes dentro de la cobertura del punto.	Conteo/estimación de personas; agregado y normalizado a FO.	Lista de chequeo + registro fotográfico.
FO2: Aulas (objetivo)	Afluencia potencial asociada a aulas/salones cubiertos por el punto.	Conteo/estimación de personas; agregado y normalizado a FO.	Lista de chequeo + registro fotográfico.
FO3: Zonas deportivas (objetivo)	Afluencia potencial en zonas deportivas cubiertas por el punto.	Conteo/estimación de personas; agregado y normalizado a FO.	Lista de chequeo + registro fotográfico.
FS1: Acceso a recolección (subjetivo)	Facilidad de acceso del personal para retirar bolsas/recipientes.	Escala ordinal 1–5; peso 0.3.	Juicio experto del personal.
FS2: Distancia recolección (subjetivo)	Esfuerzo/distancia relativa para transportar residuos al punto de acopio.	Escala ordinal 1–5; peso 0.2.	Juicio experto del personal.
FS3: Cantidad de residuos (subjetivo)	Intensidad esperada de generación de residuos en la cobertura del punto.	Escala ordinal 1–5; peso 0.5.	Observación en campo + experiencia operativa.

2) Factor objetivo. Para cada criterio objetivo $k \in K$ (p.ej., afluencia servida en zonas comunes, aulas y zonas deportivas), se agrega un valor O_{ik} por alternativa. Con pesos w_k ($\sum w_k = 1$), se normaliza por suma:

$$FO_i = \sum \{k \in K\} w_k \cdot (O_{ik} / \sum \{j\} O_{jk}).$$

3) Factor subjetivo. Para cada criterio subjetivo $s \in S$ (acceso a recolección, distancia de recolección y cantidad de residuos), se asigna una calificación r_{is} en escala ordinal y pesos v_s ($\sum v_s = 1$). Se calcula:

$$S_i = \sum \{s \in S\} v_s \cdot r_{is}$$

y se normaliza:

$$FS_i = S_i / \sum \{j\} S_j.$$

4) Medida de Preferencia de Localización. Con $\alpha \in [0,1]$ ($\alpha=0.8$ para la componente objetiva), la MPL queda:

$$MPL_i = FC_i \cdot (\alpha \cdot FO_i + (1-\alpha) \cdot FS_i).$$

Para cada zona se seleccionan las alternativas con MPL_i superior a la media aritmética (umbral MPL_z), como criterio de inclusión.

El valor $\alpha = 0.8$ se ha elegido para dar un mayor peso a los factores objetivos en la evaluación de la localización, dado que los aspectos cuantificables, como la proximidad a zonas verdes, accesibilidad, disponibilidad de recursos naturales y otros factores medibles, son fundamentales para la optimización de los puntos ecológicos en el campus. Al asignar un 80% de importancia a estos factores, se garantiza que la decisión se base en criterios objetivos y controlables, los cuales son esenciales para la eficiencia operativa y la viabilidad ecológica del proyecto. El 20% restante se destina a los factores subjetivos, como la percepción de los usuarios y la integración estética, que si bien son importantes, no tienen el mismo impacto directo en la optimización de los espacios ecológicos.

IV. RESULTADOS

El procedimiento produjo un conjunto de 23 estaciones distribuidas en cinco zonas. En términos cualitativos, la reubicación incrementa la cobertura en zonas previamente desatendidas (áreas verdes y comunes) y reduce la concentración de depósitos mixtos en puntos de alto tránsito, coherente con hallazgos que señalan la conveniencia espacial como factor clave para separación efectiva [1], [13].

La Figura 1 presenta el estado/ubicación de puntos antes del rediseño.

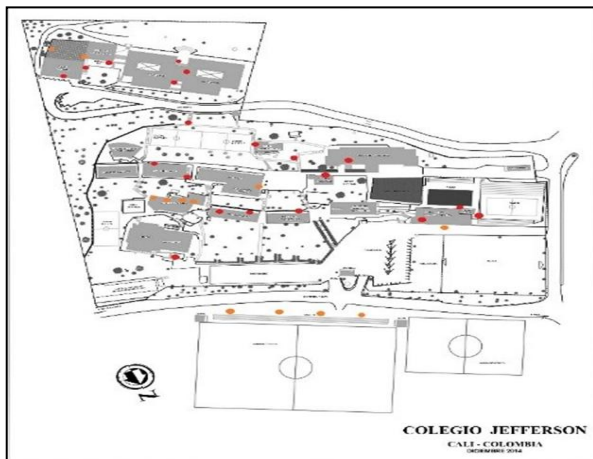


Figura 1. Ubicación actual de estaciones existentes (diagnóstico).

En figura 2 se muestra la distribución de los espacios correspondientes a cada zona.



Figura 2. Distribución de espacios en las cinco zonas.

En figura 3 se muestra la ubicación de 14 puntos ecológicos de la zona 1 antes del diagnóstico y en la figura 4 se muestran los 6 puntos ecológicos de la zona 2, igualmente antes del diagnóstico.



Figura 3. Estado actual de la zona 1 con 14 puntos ecológicos.

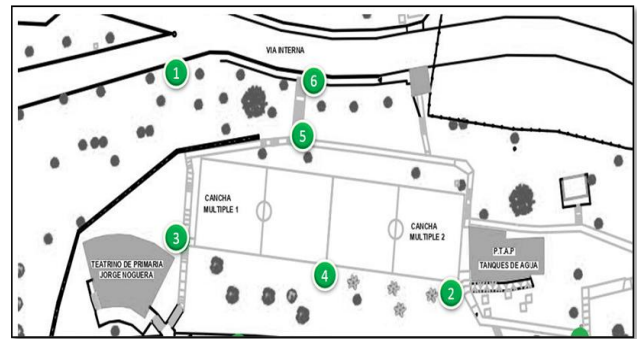


Figura 4. Estado actual de la zona 2 con 6 puntos ecológicos.

En figura 5 se muestra la ubicación de 13 puntos ecológicos de la zona 3 antes del diagnóstico y en la figura 6 se muestran las 13 alternativas de la zona 4, igualmente antes del diagnóstico.

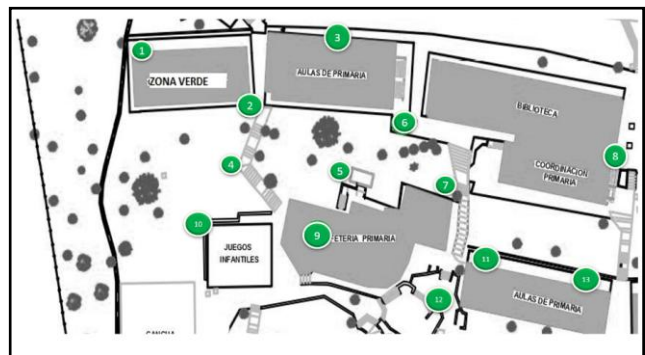


Figura 5. Estado actual de la zona 3 con 13 puntos ecológicos

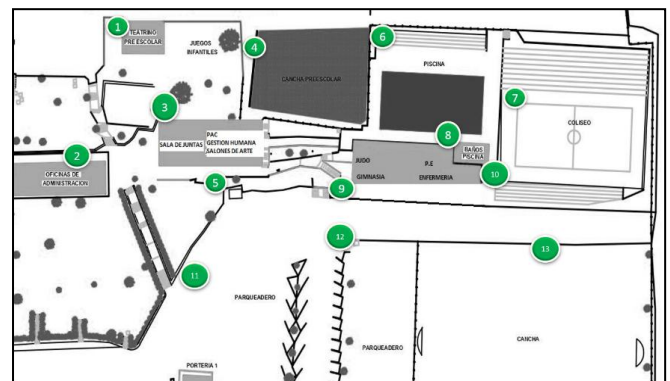


Figura 6. Estado actual de la zona 4 con 13 puntos ecológicos.

En figura 7 se muestra la ubicación de 8 puntos ecológicos de la zona 5 antes del diagnóstico

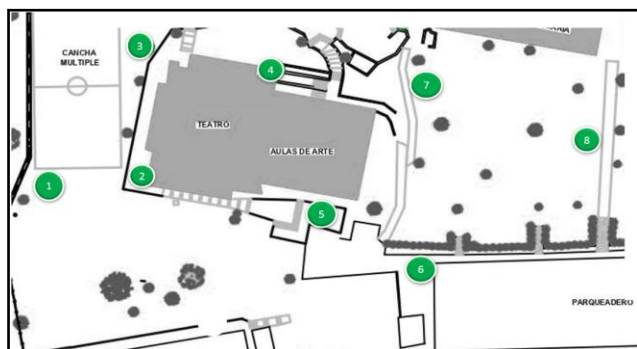


Figura 7. Estado actual de la zona 5 con 8 puntos ecológicos.

La Tabla II resume, por zona, las alternativas evaluadas (puntos), el umbral MPL calculado como media aritmética y el conjunto de puntos seleccionados ($MPL_i > MPL_z$). Este criterio de selección por zona es consistente con estrategias de reducción de puntos manteniendo nivel de servicio en modelos de ubicación y asignación [10], y con planes de asignación de número de contenedores en función de generación para evitar desbordamientos y disconformidad [9].

A partir del análisis multicriterio (Tabla II), se evidenció una diferenciación marcada entre alternativas viables y no viables. En todas las zonas se identificaron ubicaciones con resultado 0,0%, lo cual es consistente con el comportamiento de los factores críticos binarios, donde el incumplimiento de al menos un subfactor anula la alternativa ($FC_i=0$). En la Zona 1, las alternativas con mayor resultado fueron los puntos 1 (19,6%), 3 (14,6%) y 10 (14,3%); el umbral de inclusión definido por la media fue $MPL_z=7,14\%$, por lo que se seleccionaron los puntos 1, 2, 3, 7, 10 y 13 al superar dicho valor.

En la Zona 2, el desempeño se concentró en tres alternativas con valores positivos: 3 (37,8%), 5 (34,9%) y 6 (27,3%); el umbral fue $MPL_z=16,67\%$, resultando seleccionados los puntos 3 y 5 como ubicaciones con mayor preferencia relativa en dicha zona.

De forma complementaria, en las Zonas 3 y 4 se aplicó el mismo criterio de inclusión con umbral $MPL_z=7,69\%$, obteniéndose un patrón de selección equivalente: se priorizaron alternativas por encima de la media como el punto 2 (20,4% en Zona 3 y 22,2% en Zona 4), así como los puntos 4, 5, 8, 9 y 10, que mantuvieron valores consistentemente superiores al umbral ($\approx 10,2\% - 13,9\%$ según la zona).

Por último, en la Zona 5 el umbral fue $MPL_z=12,50\%$ y se seleccionaron los puntos 3 (23,2%), 8 (21,1%), 5 (20,2%) y 4 (16,9%), mientras que alternativas con desempeño parcial como 2 (9,8%) y 6 (8,8%) no alcanzaron el punto de corte. En conjunto, los resultados confirman que el umbral por media aritmética por zona permite filtrar alternativas y consolidar un conjunto final de ubicaciones priorizadas, en coherencia con la regla de inclusión priorizados.

TABLA II
Análisis Multicriterio de las alternativas evaluadas

Zona (área)	Alternativas evaluadas y resultado (%)	MPLz (media)	Selección final (puntos)
Zona 1	1(19,6%), 2(12,4%), 3(14,6%), 4(0,0%), 5(4,0%), 6(0,0%), 7(10,4%), 8(7,1%), 9(0,0%), 10(14,3%), 11(0,0%), 12(5,8%), 13(11,7%), 14(0,0%)	7,14%	1, 2, 3, 7, 10, 13
Zona 2	1(0,0%), 2(0,0%), 3(37,8%), 4(0,0%), 5(34,9%), 6(27,3%)	16,67%	3, 5
Zona 3	1(4,6%), 2(20,4%), 3(0,0%), 4(10,0%), 5(13,6%), 6(4,5%), 7(4,7%), 8(11,0%), 9(11,5%), 10(11,8%), 11(4,1%), 12(3,7%), 13(0,0%)	7,69%	2, 4, 5, 8, 9, 10
Zona 4	1(5,1%), 2(22,2%), 3(0,0%), 4(11,6%), 5(10,9%), 6(5,6%), 7(0,0%), 8(8,1%), 9(13,9%), 10(13,3%), 11(4,7%), 12(4,7%), 13(0,0%)	7,69%	2, 4, 5, 8, 9, 10
Zona 5	1(0,0%), 2(9,8%), 3(23,2%), 4(16,9%), 5(20,2%), 6(8,8%), 7(0,0%), 8(21,1%)	12,50%	3, 4, 5, 8

El uso de umbrales por zona (MPL_z) sigue una lógica comparable a trabajos que aplican criterios de cobertura y accesibilidad para definir redes de contenedores [5], [11]. En la figura 8 podemos ver el mapa completo con todos los puntos escogidos para un total de 23 estaciones y así tener una mejor visual de la ubicación según el resultado de la metodología de análisis multicriterio.

De acuerdo con la literatura reciente sobre el “waste bins location problem” reporta que la configuración espacial de contenedores afecta simultáneamente el costo del sistema y la calidad del servicio, y que es frecuente la necesidad de combinar criterios heterogéneos (servicio, operación, restricciones y aceptación social) en una misma formulación [4]. En este sentido, la adaptación de Brown–Gibson utilizada en este estudio aporta un mecanismo simple y trazable para integrar restricciones duras (factores críticos) con criterios de servicio (afluencia/cobertura) y criterios operativos percibidos por el personal (acceso y distancia de recolección), lo cual es

consistente con enfoques multicriterio recientes para decisiones de localización en infraestructura de residuos [6].

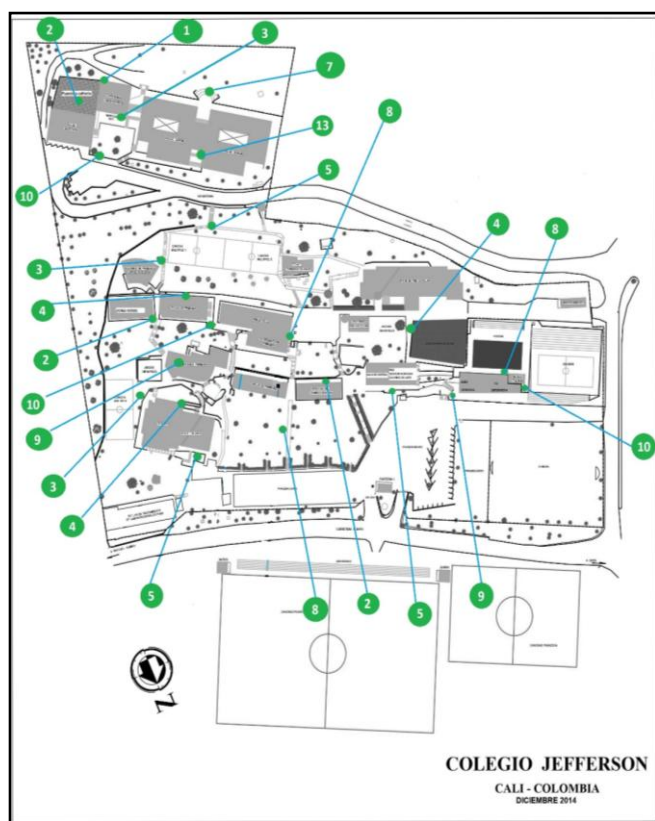


Figura 8. Puntos ecológicos finales por zonas (configuración propuesta).

En contraste con propuestas basadas en GIS y algoritmos de localización-asignación (p. ej., p-median/p-center) que optimizan cobertura y eficiencia de rutas a escala municipal [8], incluyendo marcos inteligentes de gestión y recolección [18] y análisis tecno-económicos en ciudades inteligentes [19], el aporte aquí se centra en un microentorno (campus) donde la aceptabilidad y el uso correcto dependen fuertemente de la conveniencia percibida.

Evidencia empírica en comunidades universitarias muestra discrepancias entre intención y conducta real de separación y resalta la relevancia de la facilidad de uso y la infraestructura disponible [1]; resultados similares se observan en modelos conductuales basados en TPB extendida con estudiantes universitarios [20]. Por ello, incorporar criterios subjetivos (FS) ligados a operación y generación, aunque con menor peso que la componente objetiva ($\alpha=0.8$), es una decisión metodológica alineada con estos hallazgos. Además, alternativas de electrificación y optimización de rutas han mostrado reducciones de distancia, emisiones y costos en modelos recientes, lo cual abre la puerta a extender este trabajo con flotas eléctricas y restricciones energéticas [21], [22]. Finalmente, para flujos especiales (p. ej., RAEE),

modelos de localización-asignación bi-objetivo ofrecen una referencia metodológica para extender la MPL a cadenas de recolección diferenciadas [23].

Adicionalmente, una revisión sistemática sobre intervenciones de segregación destaca alta heterogeneidad y la necesidad de diseños que permitan evaluar efectividad comparativa de estrategias (información, conveniencia, incentivos, etc.) [13]. En este trabajo, la reconfiguración espacial genera una base operacional para dichas intervenciones: al mejorar accesibilidad y visibilidad (FC), se reduce una barrera estructural para la participación. Como limitación, aún no se reportan indicadores post-implementación (captura, contaminación de reciclables, frecuencia de vaciado). Una extensión directa es instrumentar mediciones antes-después y, en línea con tendencias de gestión inteligente y optimización con soporte GIS, considerar analítica operacional y optimización de rutas para evaluar desempeño y ajustar parámetros (α , pesos) por aprendizaje local [24], [25], [9].

V. CONCLUSIONES

Se desarrolló y validó un procedimiento multicriterio mixto para optimizar la ubicación de puntos ecológicos en un campus escolar, integrando criterios críticos de viabilidad, componentes objetivas asociadas a cobertura y afluencia, y componentes subjetivas relacionadas con la operación de recolección y condiciones del entorno. El enfoque permitió estructurar el problema como una evaluación jerárquica por zonas, garantizando que las alternativas seleccionadas cumplieran requisitos mínimos de implementación antes de ser ponderadas por su desempeño global.

La aplicación en un caso real condujo a la definición de una propuesta de 23 estaciones distribuidas en cinco zonas, priorizando ubicaciones con mayor accesibilidad funcional y mayor potencial de servicio a usuarios en áreas comunes, aulas y espacios deportivos. El resultado ofrece una configuración coherente con la lógica de cobertura territorial por zonas y con la necesidad de consolidar puntos estratégicos que faciliten la separación en la fuente, al tiempo que reduce la probabilidad de instalar estaciones en sitios operativamente inviables o con baja interacción de usuarios.

Metodológicamente, el uso de un umbral de selección basado en la media zonal permitió filtrar alternativas de manera consistente y replicable, generando un conjunto final de ubicaciones con desempeño relativo superior dentro de cada zona. Este criterio facilita la transferencia del procedimiento a otros campus o instituciones con estructuras espaciales similares, siempre que se cuente con un levantamiento de información equivalente para caracterizar afluencia, condiciones físicas, accesos y operación de recolección.

Como líneas de trabajo futuro, se recomienda instrumentar mediciones sistemáticas de desempeño de las

estaciones (tasa de captura, nivel de contaminación por mezcla, frecuencia real de uso y saturación), así como integrar la optimización de rutas y frecuencias de recolección para reducir costos operativos y tiempos de servicio. Adicionalmente, se sugiere evaluar intervenciones educativas y de señalización, diseñadas como experimentos controlados, para estimar su contribución marginal sobre la calidad de segregación y la adopción sostenida de prácticas de disposición adecuada.

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro sincero reconocimiento al Semillero de Investigación en Tecnología e Ingeniería – SITI, adscrito al programa de Ingeniería Industrial de UNIMINUTO sede Cali, por su valiosa colaboración en el desarrollo de esta investigación. Asimismo, agradecemos al Colegio Jefferson por su disposición para facilitar el acceso a la institución y por el apoyo brindado durante la recolección de información y la implementación del estudio.

REFERENCIAS

- [1] Z. Xia, S. Zhang, X. Tian, and Y. Liu, "Understanding waste sorting behavior and key influencing factors through internet of things: Evidence from college student community," *Resources, Conservation & Recycling*, vol. 174, Art. no. 105775, 2021, doi: 10.1016/j.resconrec.2021.105775.
- [2] N.-V. Bang *et al.*, "Towards sustainable education: Investigating waste source sorting behavior among students in Vietnam," *Social Sciences & Humanities Open*, vol. 11, Art. no. 101446, 2025, doi: 10.1016/j.ssaho.2025.101446.
- [3] X. Zhang, "A systematic literature review on individuals' waste separation behavior," *Resources, Environment and Sustainability*, vol. 14, Art. no. 100137, 2023, doi: 10.1016/j.resenv.2023.100137.
- [4] D. G. Rossit, V. Nevrlý, D. Šomplák, and M. Pavlas, "Waste bins location problem: A review of recent advances in the storage stage of the municipal solid waste reverse logistic chain," *Journal of Cleaner Production*, vol. 342, Art. no. 130793, 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.130793.
- [5] V. Nevrlý, D. Šomplák, M. Pavlas, and D. G. Rossit, "Location of municipal waste containers: Trade-off between criteria," *Journal of Cleaner Production*, vol. 278, Art. no. 123445, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123445.
- [6] Y. Duan, B. Hu, S. Ri, L. Wang, and M. Zhou, "A hybrid multi-criteria decision-making model for waste facilities location considering system resilience," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 193, Art. no. 110326, 2024, doi: 10.1016/j.cie.2024.110326.
- [7] E. Bağcıoğlu *et al.*, "Integrated solid waste management strategy of a large campus: A comprehensive study on METU campus, Turkey," *Journal of Cleaner Production*, vol. 265, Art. no. 121715, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121715.
- [8] M. M. Kwikima and F. Ngole, "GIS-based optimization of solid waste collection points and routes: A case study of Majengo Ward, Sumbawanga Municipality, Tanzania," *Cleaner Waste Systems*, vol. 12, Art. no. 100372, 2025, doi: 10.1016/j.clwas.2025.100372.
- [9] S. Su *et al.*, "A flexible waste bin number allocation plan applied to waste transportation electric fleets in smart cities," *Sustainable Cities and Society*, vol. 121, Art. no. 106223, 2025, doi: 10.1016/j.scs.2025.106223.
- [10] A. Viktorin, V. Nevrlý, D. Šomplák, and M. Pavlas, "Hierarchical clustering-based algorithms for optimal waste collection point locations in large-scale problems: A framework development and case study," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 178, Art. no. 109142, 2023, doi: 10.1016/j.cie.2023.109142.
- [11] H. Li, Y. Hou, and T. Luo, "The household waste collection points location problem with nearest-allocation and waste classification in rural Xi'an, China," *Waste Management*, vol. 209, Art. no. 115211, 2026, doi: 10.1016/j.wasman.2025.115211.
- [12] N. Leeabai, S. Areeprasert, W. Khaothiar, and S. Towprayoon, "The effects of compost bin design on design preference, waste collection performance, and waste segregation behaviors for public participation," *Waste Management*, vol. 143, pp. 35–45, 2022, doi: 10.1016/j.wasman.2022.02.018.
- [13] T. Trushna *et al.*, "Interventions to promote household waste segregation: A systematic review," *Heliyon*, vol. 10, no. 2, Art. no. e24332, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e24332.
- [14] A. Jakimiuk *et al.*, "Closing the loop: A case study on pathways for promoting sustainable waste management on university campuses," *Science of the Total Environment*, vol. 892, Art. no. 164349, 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.164349.
- [15] E. El-Halwagy, "Towards waste management in higher education institute: The case of architecture department (CIC–New Cairo)," *Results in Engineering*, vol. 23, Art. no. 102672, 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.102672.
- [16] L. Luo *et al.*, "How does environmental education affect college students' waste sorting behavior: A heterogeneity analysis based on educational background," *Journal of Environmental Management*, vol. 389, Art. no. 126064, 2025, doi: 10.1016/j.jenvman.2025.126064.
- [17] M. Caramia, D. M. Pinto, E. Pizzari, and G. Stecca, "Clustering and routing in waste management: A two-stage optimisation approach," *EURO Journal on Transportation and Logistics*, vol. 12, Art. no. 100114, 2023, doi: 10.1016/j.ejtl.2023.100114.
- [18] A. Alsobky, M. Ahmed, S. Al Agroudy, and K. El Araby, "A smart framework for municipal solid waste collection management: A case study in Greater Cairo Region," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 14, no. 6, Art. no. 102183, 2023, doi: 10.1016/j.asej.2023.102183.
- [19] N. F. Kasem *et al.*, "Techno-economic impact analysis of solid waste collection optimization and management for smart city towards achieving sustainable development goals," *Cleaner Waste Systems*, vol. 12, Art. no. 100447, 2025, doi: 10.1016/j.clwas.2025.100447.
- [20] M.-F. Waxin, H. Baber, A. Bartholomew, and A. Ahammed, "Exploring waste sorting behavior and its antecedents among university students in the UAE using an extended theory of planned behavior," *Cleaner Waste Systems*, vol. 12, Art. no. 100402, 2025, doi: 10.1016/j.clwas.2025.100402.
- [21] D. Peña, B. Dorronsoro, and P. Ruiz, "Sustainable waste collection optimization using electric vehicles," *Sustainable Cities and Society*, vol. 105, Art. no. 105343, 2024, doi: 10.1016/j.scs.2024.105343.
- [22] K. Kocsis, J. Kövendi, and B. Bokor, "Waste collection route optimisation for the second waste-to-energy plant in Budapest," *Sustainable Cities and Society*, vol. 117, Art. no. 105953, 2024, doi: 10.1016/j.scs.2024.105953.
- [23] N. Koshta, S. Patra, and S. P. Singh, "A location-allocation model for E-waste acquisition from households," *Journal of Cleaner Production*, vol. 440, Art. no. 140802, 2024, doi: 10.1016/j.jclepro.2024.140802.
- [24] S. Yalcinkaya and H. İ. Kaleli, "Optimizing municipal solid waste collection with GIS-Based high-density routing and zoning," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 148, Art. no. 105012, 2025, doi: 10.1016/j.trd.2025.105012.
- [25] P. Jaipakdee, P. Vibhatabandhu, P. Vitayavarawat, and N. Supakata, "Waste composition and engagement in management initiatives: A study at Chulalongkorn University across academic periods," *Green Technologies and Sustainability*, vol. 4, Art. no. 100252, 2025, doi: 10.1016/j.grets.2025.100252.