

PROPUESTA PARA MANEJO Y DISPOSICIÓN DE RESIDUOS DEL MUNICIPIO DE MUZO, BOYACÁ

PROPOSAL FOR WASTE MANAGEMENT AND DISPOSAL IN MUZO, BOYACA

Felipe Correa Mahecha*
Juan Andrés Sandoval Herrera**
Luisa Fernanda Díaz Bohórquez***
Laura Gallego Escobar****

Recibido: 19 de febrero de 2019 Aceptado: 28 de junio de 2019

DOI: <https://doi.org/10.29097/2011-639X.218>

Resumen

Este trabajo muestra el resumen técnico del proceso de elaboración de una propuesta para el tratamiento de los residuos sólidos del municipio de Muzo, departamento de Boyacá, realizada en 2016. Se llevó a cabo el diagnóstico de la situación de manejo de los residuos, así como los resultados de su caracterización. Según el diagnóstico, el municipio generaba cerca de 25 toneladas de residuos sólidos semanalmente, de los cuales el 63.7% en masa corresponde a residuos orgánicos; el 17.21%, a residuos aprovechables, y el 4.74%, a residuos de alta complejidad de tratamiento. Posteriormente, se seleccionó la mejor alternativa para el manejo de cada tipo de residuo, de acuerdo con las condiciones reales del municipio y con ayuda de la metodología TOPSIS difusa. Finalmente, se elaboró la propuesta definitiva, enfocada hacia la valorización.

Palabras clave: gestión integral de residuos, TOPSIS, residuos valorizables, reciclaje.

Abstract

This work presents a technical summary of the elaboration of the proposal for solid waste treatment in Muzo, Boyaca, during 2016. The diagnosis of waste management panorama was realized, including the results of characterization. About 25 tons of solid waste per week were produced; 63.7% of which were organic waste; 17.21% valuable waste; and 4.74% high complexity waste. After that, the best option for each type is selected according to the real conditions of location, by means of diffuse TOPSIS technique (technique for order performance by similarity to ideal solution). Finally, the definitive proposal is presented, focused to the recovery.

Keywords: integral waste management, TOPSIS, valuable waste, recycling

*Docente investigador. Grupo de investigación Ambiente y Hábitat, Fundación Universidad de América, Bogotá D. C., Colombia. ORCID: 0000-0003-1050-8222. felipe.correa@profesores.uamerica.edu.co

** Docente investigador. Director grupo de investigación Ambiente y Hábitat, Fundación Universidad de América, Bogotá D. C. ORCID: 0000-0001-8957-1421. juan.sandoval@profesores.uamerica.edu.co

*** Estudiante de Ingeniería Química, Fundación Universidad de América, Bogotá D. C., Colombia. luisa.bohorquez@estudiantes.uamerica.edu.co

**** Estudiante de Ingeniería Química, Fundación Universidad de América, Bogotá D. C., Colombia. laura.gallego@estudiantes.uamerica.edu.co

INTRODUCCIÓN

El municipio de Muzo está ubicado en el occidente del departamento de Boyacá, Colombia. Cuenta con una población total de aproximadamente 9834 personas, de las cuales 5389 habitan en el área urbana, según el censo del Dane de 2005. El estudio realizado por la alcaldía municipal en el 2013 arrojó que la producción total de residuos sólidos es de 824.4 toneladas anuales, con una producción per cápita (PPC) de 0.0041 ton/hab/día (Alcaldía Municipal de Muzo, 2013), una cobertura del servicio de recolección del 100% en el casco urbano y un total de 1122 suscriptores (Alcaldía Municipal de Muzo, 2016). El reciente informe de gestión informa que el municipio es ejemplo en el occidente del país respecto a la implementación de la educación ambiental y del manejo, aprovechamiento y separación en la fuente de los residuos sólidos (Alcaldía Municipal de Muzo, 2018). Por su parte, el informe 2018 de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, sobre disposición final de residuos sólidos, informa que el municipio dispone un promedio de 3.32 ton/día en el relleno sanitario Parque Ambiental Pirgua.

La política pública para la gestión integral de residuos sólidos en Colombia, establecida en el documento Conpes 3874, señala la necesidad de promover un avance gradual hacia la economía circular, así como incentivar la cultura ciudadana, la educación y la innovación en la gestión de los residuos, con el fin de fomentar la reducción, reutilización y adecuada separación en la fuente de los residuos. Esto permitirá un incremento de los índices de reciclaje de los mismos, reduciendo la presión sobre la capacidad de los rellenos sanitarios y ahorrando recursos valiosos (Departamento Nacional de Planeación, 2016). Por otra parte, el modelo de gestión integral de residuos propuesto por la Guía Técnica Colombiana 86 (Icontec, 2003) se basa en la metodología del ciclo continuo PHVA (planificar, hacer, verificar y actuar), a fin de promover una mejora continua en la gestión de residuos. Esta gestión involucra la toma de decisiones sobre tratamientos de residuos sólidos y su posterior verificación y mejora.

En situaciones en las que la toma de decisiones es compleja por la interrelación de variables cuantitativas y cualitativas, como el manejo de los residuos sólidos municipales, se ha evidenciado que los métodos de análisis multicriterio (MCDA, sigla en inglés) son efectivos (Soltani et ál., 2015). Una revisión completa sobre la aplicación de métodos MCDA a los problemas de gestión de residuos la presenta la investigación de Achillas, Moussiopoulos, Karagiannidis, Baniyas y Perkoulidis (2013). En este estudio se destacan metodologías como Promethee, Thor, Ahp, Oreste, Gis y TOPSIS⁵. Esta última, desarrollada por Hwang y Yoon en 1981, es una de las metodologías de selección multicriterio clásicas, la cual está basada en el principio de que la alternativa seleccionada debe tener la distancia más corta a una solución ideal positiva (PIS) y estar más lejana a la solución ideal negativa (NIS). Chen y Hwang (1992) combinaron este método con la teoría difusa para facilitar la puntuación de criterios y alternativas, por medio de la relación entre unas variables lingüísticas, que determinan la calificación de los tomadores de decisión, y unos números difusos, que permiten cuantificar este puntaje (Zadeh, 1975). Más adelante, el método TOPSIS difuso fue desarrollado por autores como Ekmekçioğlu, Kaya y Kahraman (2010), Kutlu y Ekmekçioğlu (2012), Wibowo y Deng (2015) y Kaliszewski y Podkopaev (2016). En la actualidad, ha sido aplicado a la toma de decisiones sobre tratamiento y disposición de residuos sólidos urbanos en Estambul (Coban, Ertis, y Cavdaroglu, 2018), el archipiélago canario (Estay-Ossandon, Mena-Nieto y Harsch, 2018), Teherán (Heidari, Yazdanparast y Jabbarzadeh, 2019), entre otras regiones.

⁵ Sigla en inglés de Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution, que se traduce como "técnica para ordenar alternativas de acuerdo con su similitud con el ideal".

El presente artículo está dirigido, precisamente, a proponer una estrategia de valorización de los residuos sólidos para el municipio de Muzo, Boyacá, por medio de la aplicación de la metodología TOPSIS difusa. Se describen cada una de las etapas del método, partiendo de la caracterización y diagnóstico de los residuos sólidos municipales. Luego se generan alternativas con sus respectivos criterios de evaluación y se asignan los pesos de cada criterio según encuesta a expertos. Con base en esto se construye la matriz de decisión con números difusos, para luego introducir las variables ficticias, elaborar la matriz ponderada (mediante la cual se calcula la PIS y la NIS) y calcular el índice de proximidad de cada alternativa. Finalmente, se obtiene el valor concreto de ese conjunto difuso, que se traduce en valores lingüísticos que dan forma a la propuesta de valorización de cada tipo de residuo. De manera que el presente trabajo se propone como una guía metodológica para futuros estudios de aplicación de metodología TOPSIS a situaciones de alta complejidad en la toma de decisiones.

MATERIALES Y MÉTODOS

Caracterización y diagnóstico

La caracterización y diagnóstico de los residuos se realizó en una semana. Todos los residuos del municipio se llevaron al centro de acopio, donde se separaron manualmente por fracción inorgánica (papel, cartón, plástico, metal, vidrio, entre otros), orgánica y no aprovechables o de alta complejidad en su tratamiento. Se caracterizó cada fracción con base en las normas técnicas colombianas y la literatura existente. Específicamente, la clasificación del plástico tuvo en cuenta el código de identificación de resinas de plástico citado en la Guía Técnica Colombiana 53-2 (Icontec, 2004); el vidrio se clasificó según color; el metal se separó en metales ferrosos y no ferrosos, y el papel y el cartón se dividieron en esos dos materiales. El muestreo de los residuos orgánicos y de los agentes de carga fue desarrollado según Norma Técnica Colombiana 6029 (Icontec, 2013). A las muestras se les realizaron análisis de porcentaje de carbono total (%C), nitrógeno total (%N), cenizas y humedad. Fue necesario el cálculo de los sólidos volátiles a partir del porcentaje de cenizas (Díaz y Gallego, 2016).

Para el cálculo del porcentaje en peso de cada residuo se utilizó una báscula industrial. Inicialmente, se pesó la totalidad de los residuos (sin ser clasificados). Después de la separación por tipo de residuo, cada fracción fue pesada. El porcentaje fue calculado de acuerdo con la ecuación 1.

$$\% \text{ peso} = \frac{W_{\text{residuo}}}{W_{\text{total de residuos}}} * 100 \% \quad (1)$$

Para el cálculo de la densidad aparente de cada residuo, se pesó un recipiente vacío de volumen conocido y, posteriormente, se llenó con el residuo y se pesó nuevamente. Esta magnitud se calculó con la ecuación 2.

$$\rho_{\text{aparente}} = \frac{W_{\text{recipiente lleno}} - W_{\text{recipiente vacío}}}{V_{\text{recipiente}}} \quad (2)$$

Teniendo la densidad aparente del material se procedió a calcular el volumen de cada residuo según la ecuación 3.

$$V = \frac{m}{\rho_{\text{aparente}}} \quad (3)$$

Método TOPSIS

La tabla 1 describe brevemente los pasos a seguir en este método. La PIS (*positive ideal solution*) es la distancia más corta a la solución ideal positiva, mientras que la NIS (*negative ideal solution*) es la distancia más corta a la solución ideal negativa.

Tabla 1. Descripción breve del método TOPSIS difuso

PASO	DESCRIPCIÓN
1	Identificación de los criterios de evaluación
2	Generación de alternativas
3	Evaluación de alternativas en función de los criterios
4	Identificación de los pesos de los criterios
5	Construcción de la matriz de decisión con números difusos
6	Introducción de las variables ficticias
7	Construcción de la matriz ponderada normalizada
8	Determinación de la solución ideal positiva y la negativa
9	Cálculo de la PIS y la NIS de cada alternativa
10	Cálculo del índice de proximidad de cada alternativa
11	Obtención del valor representativo, concreto, del conjunto difuso
12	Salida de valores lingüísticos

Fuente: adaptada de García-Cascales y Lamata (2010).

Los criterios de evaluación tienen en cuenta los aspectos más importantes del desarrollo del municipio. Según Soltani et ál. (2015), estos criterios son medio ambiente, economía, requerimientos técnicos (infraestructura) e impacto social (generación de empleo). Otros autores, como Stay-Ossandos et ál. (2018), consideran otros criterios, como medio ambiente, el factor político, el medio social, la economía y la tecnología. En la tabla 2 se presentan los criterios seleccionados en este trabajo y su respectiva descripción.

Tabla 2. Descripción de los criterios a evaluar para la selección de las alternativas para cada tipo de residuo aplicando el método TOPSIS difuso

CRITERIO	DESCRIPCIÓN
C1 Impacto ambiental	Reducción de residuos enviados al relleno sanitario de Carapacho; generación de olores desagradables; emisión de gases y vapores; afectación de fuentes hídricas.
C2 Sostenibilidad económica	Evaluación de la inversión inicial en equipos; costos operativos y de mantenimiento; beneficios económicos.
C3 Requerimientos técnicos	Cantidad; facilidad de adquisición; facilidad de manejo; tamaño de los equipos requeridos, el cual dependerá, inicialmente, del volumen de dichos residuos.
C4 Impacto social	Generación de nuevos empleos.

Habiendo identificado los criterios, se generaron las alternativas por tipo de residuo, lo que se muestra en la tabla 3. Cada alternativa incluye separación o clasificación previa, en algunos casos

mínima, como, por ejemplo, la alternativa venta en bruto. En los demás casos se realiza con detalle la clasificación y separación de los residuos según su valorización. Al final, todas las alternativas tienen una etapa de almacenamiento, transporte y venta, porque uno de los objetivos es que sea económicamente viable, ya que por definición son residuos valorizables; por lo tanto, la disposición final no es una opción desde el punto de vista ambiental. Cada alternativa fue rigurosamente estudiada de acuerdo con factores económicos, técnicos, ambientales y sociales, pero no se presentan aquí los detalles por la extensión del trabajo.

Tabla 3. Descripción de las alternativas por tipo de residuo

TIPO DE RESIDUO	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3
Plástico	Venta en bruto: recolección y venta sin clasificación ni valorización previa (solamente se lavan).	Venta con valorización por peletizado: incluye separación por densidad, separación por colores, trituración, tamizado, lavado y secado, aglutinado, extrusión, peletizado.	Venta con valorización por moldeo: incluye separación por densidad, trituración, almacenamiento, pesaje, extrusión, moldeo para obtener madera plástica.
Vidrio	Venta en bruto: recolección y venta sin clasificación ni valorización previa.	Venta con valorización por clasificación y triturado: incluye separación por colores, trituración, limpieza.	Venta con valorización por clasificación: la diferencia con la alternativa anterior es que no incluye trituración.
Metal	Venta en bruto: separación de los residuos metálicos del resto de residuos, limpieza.	Venta con valorización por clasificación y compactación: incluye clasificación en metales ferrosos y no ferrosos (mediante separador magnético industrial), limpieza, compactación.	Venta con valorización por trituración, clasificación y tratamiento: incluye trituración, limpieza, separación magnética, remoción electrolítica del estaño, remoción de laqueado por aire caliente.
Papel y cartón	Venta con valorización por prensado: separación de los residuos de papel y cartón del resto de residuos, compactación o prensado.	Venta con valorización por trituración y prensado: incluye clasificación en papel (bond, de periódico, de revista y cartón), trituración, compactación o prensado.	N. A.
Orgánicos	Lombricultura: incluye trituración, acondicionamiento, riego periódico, cosechado, tamizado.	Digestión anaerobia: muestreo, caracterización, trituración, llenado del biodigestor y obtención del biogás.	Compostaje: muestreo, caracterización, trituración, llenado de reactores, molido, tamizado.

Los pesos de los criterios para cada alternativa se desarrollaron con base en una encuesta realizada a tres expertos: María Camila Yepes Peláez, ecóloga y bióloga de la Universidad Pontificia Universidad Javeriana; Carlos Ordoñez Guzmán, ingeniero agrónomo de la Universidad Nacional de Colombia, y Luis Fernando Díaz Rodríguez, concejal (desde hace cuatro periodos) del municipio de Muzo y conoedor de temas agrícolas y de ordenamiento territorial.

El desarrollo matemático del método consta de los siguientes pasos, que son descritos con las ecuaciones respectivas, donde es necesario:

Paso 1: sumar los pesos de importancia. Se define W_{jt} ($j = 1, 2, \dots, n; t = 1, 2, \dots, k$) como el puntaje del criterio C_j con respecto a los demás criterios dados por los expertos (véase tabla 2). El peso W_j del criterio C_j se calcula mediante la ecuación 4.

$$W_j = \frac{\sum_{t=1}^k w_{jt}}{k} \tag{4}$$

• *Paso 2: normalizar los valores de la matriz.*

$$\bar{W}_j = \frac{W_j}{\sum W_j} \tag{5}$$

• *Paso 3: establecer la importancia de cada criterio.* Se promedian los pesos \bar{W}_j del criterio C_j con respecto a los demás criterios J .

• *Paso 4: sumar los puntajes dados a la alternativa.* La ecuación 6 se usa para obtener la sumatoria de los puntajes de la alternativa R_{ij} .

$$R_{ij} = \frac{\sum_{t=1}^k r_{ijt}}{k} \tag{6}$$

• *Paso 5: construir la matriz de decisión normalizada.* Sea $S = [S_{ij}]_{m \times n}$ la matriz normalizada. El valor normalizado S_{ij} se calcula mediante la ecuación 7.

$$s_{ij} = \frac{R_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (R_{ij})^2}} \tag{7}$$

• Siendo $V = [V_{ij}]_{m \times n}$ la matriz de decisión, el puntaje V_{ij} se halla mediante la multiplicación de los elementos de la matriz de selección normalizada y los pesos de los criterios W_j .

$$v_{ij} = W_j \cdot s_{ij} \tag{8}$$

• *Paso 6: determinar la solución ideal positiva (PIS) y la solución ideal negativa (NIS).* El PIS, A^+ , y el NIS, A^- , se establecen mediante las ecuaciones 9 y 10, respectivamente.

$$A^+ = \{v_{ij}\} \tag{9}$$

$$A^- = \{v_{ij}\} \tag{10}$$

- *Paso 7: medir la distancia de cada alternativa con respecto al PIS y el NIS, respectivamente.* La distancia que existe entre la alternativa y la solución ideal positiva es denominada d_i^+ (ecuación 11). Por su parte, la distancia que existe entre la alternativa y la solución ideal negativa se llama d_i^- (ecuación 12).

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_{ij}^+)^2}, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (11)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_{ij}^-)^2}, \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (12)$$

- *Paso 8: calcular el coeficiente de proximidad relativa y escoger la mejor alternativa.* El coeficiente de proximidad relativo de la alternativa i , RCC_i , se calcula según la ecuación 13, con base en los resultados de las ecuaciones anteriores (4 a 12):

$$RCC_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (13)$$

Una alternativa A_i está más cerca del *PIS* y más lejos del *NIS* conforme su RCC_i esté más cercano a 1. Por lo tanto, de acuerdo con el coeficiente de cercanía, se puede determinar el orden de clasificación de las alternativas y seleccionar la más adecuada dentro de un conjunto de alternativas posibles.

RESULTADOS

Del diagnóstico

La tabla 4 presenta los resultados del diagnóstico general de residuos sólidos.

Tabla 4. Caracterización de residuos sólidos generados semanalmente en Muzo

RESIDUO	PESO (TON)	%PESO	DENSIDAD APARENTE (kg/m ³)	VOLUMEN (m ³)
Plástico	2.475	9.95	34.00	72.8
Vidrio	0.378	1.52	200.0	1.89
Metal	0.416	1.67	25.00	16.6
Papel y cartón	1.013	4.07	19.50	51.9
De alta complejidad	4.742	19.1	-	-
Orgánicos	15.856	63.7	762.5	20.8

La tabla 5 muestra la caracterización de las diferentes fracciones de cada tipo de residuo aprovechable inorgánico.

Tabla 5. Resultados de la caracterización por tipo de residuo

CATEGORÍAS	PESO (TON)	%PESO	VOLUMEN (m ³)	
PLÁSTICOS				
	1	1.025	41.4	30.1
	2	0.152	6.14	4.50
Resinas termoplásticas	3	0.041	1.65	1.20
	4	0.317	12.8	9.30
	5	0.272	11.0	8.00
	6	0.451	18.2	13.3
7 (Termoestable)	0.217	8.76	6.38	
VIDRIO				
Blanco	0.378	99.9	1.89	
Verde	8.69E-5	0.023	4.35E-4	
Ámbar	1.67E-4	0.044	8.35E-4	
METAL				
Ferrosos	0.173	41.59	6.92	
No ferrosos	0.243	58.41	9.72	
PAPEL/CARTÓN				
Papel	0.540	53.3	27.7	
Cartón	0.473	46.7	24.2	

Se observa que las fracciones con mayor volumen son los plásticos, seguidos de papel y cartón, mientras que la del vidrio es la de menor volumen. Los residuos orgánicos presentan un volumen intermedio. Estos valores serán determinantes para el dimensionamiento de equipos. La fracción de residuos de alta complejidad y/o no aprovechables fue 19.06% (tabla 4), que corresponde a bombillas, parabrisas, vidrios de vehículos, material deteriorado, pilas, escombros, textiles y otros, como papel higiénico o pañales. El municipio debe seguir pagando al relleno sanitario de Carapacho la disposición de los considerados no aprovechables.

La mayor fracción de residuo corresponde a los orgánicos aprovechables, con un 63.7% en masa (tabla 4), compuesta principalmente de residuos de comida y en menor proporción de aserrín y residuos de jardín. En la tabla 6 se muestran los resultados de su caracterización, así como de los agentes de carga que luego se emplearían para realizar su aprovechamiento.

Tabla 6. Caracterización de los residuos sólidos orgánicos municipales (RSOM) y de los agentes de carga (estiércol de bovino y poda de pasto), porcentajes en base húmeda

MATERIAL	%C	%N	%HUMEDAD	%CENIZAS	%SÓLIDOS VOLÁTILES	C:N
Residuos orgánicos municipales	20.9	0.924	42.2	3.18	54.6	22.7
Estiércol de bovino	21.9	0.814	45.7	10.8	43.5	27.0
Poda de pasto	25.01	2.313	39.14	6.268	54.58	10.82

Del método TOPSIS

En la tabla 7 se muestra el resumen de resultados de las alternativas por cada tipo de residuo, con las distancias al PIS y al NIS y el coeficiente de proximidad relativa (o de cercanía) de cada alternativa, (RCC_i), calculado mediante la ecuación 13.

Tabla 7. Matriz de decisión con peso de los criterios y distancia a la solución ideal

RESIDUOS PLÁSTICOS							
	C1	C2	C3	C4	D+	D-	RCC
A1	0.1584	0.1755	0.1089	0.0544	0.1242	0.0028	0.022
A2	0.2478	0.1727	0.1665	0.1185	0.0028	0.1242	0.978
A3	0.2275	0.1727	0.1451	0.0991	0.0354	0.0899	0.089
RESIDUOS DE VIDRIO							
	C1	C2	C3	C4	D+	D-	RCC
A1	0.1849	0.1854	0.0972	0.0749	0.0896	0.0390	0.303
A2	0.2419	0.2016	0.1395	0.1270	0.0000	0.1040	1.000
A3	0.2134	0.1463	0.1271	0.1021	0.0681	0.0494	0.420
RESIDUOS METÁLICOS							
	C1	C2	C3	C4	D+	D-	RCC
A1	0.1824	0.1418	0.0959	0.0640	0.0778	0.0000	0.000
A2	0.2311	0.1585	0.1214	0.0989	0.0213	0.0672	0.759
A3	0.2270	0.1557	0.1427	0.0640	0.0353	0.0662	0.652
RESIDUOS DE PAPEL Y CARTÓN							
	C1	C2	C3	C4	D+	D-	RCC
A1	0.2329	0.1810	0.1224	0.0965	0.0882	0.0000	0.000
A2	0.2898	0.2201	0.1686	0.1263	0.0000	0.0882	1.000
RESIDUOS ORGÁNICOS							
	C1	C2	C3	C4	D+	D-	RCC
A1	0.2418	0.1659	0.1148	0.1045	0.0123	0.1084	0.898
A2	0.1521	0.1364	0.1045	0.0522	0.1102	0.0000	0.000
A3	0.2379	0.1632	0.1271	0.1045	0.0047	0.1064	0.957

Lo más importante en esta tabla es el valor del coeficiente de proximidad relativa, RCC_i. Se selecciona la alternativa cuyo RCC_i esté más cercano a 1. Por lo tanto, la mejor alternativa seleccionada para residuos plásticos fue la A2: venta con valorización por peletizado; para residuos de vidrio fue la A2: venta con valorización por clasificación y triturado, y así sucesivamente. Las mejores alternativas se presentan en la tabla 8.

Tabla 8. Mejores alternativas para tipo de residuo según método TOPSIS

TIPO DE RESIDUO	MEJOR ALTERNATIVA
Plásticos	Venta con valorización por peletizado (A2)
Vidrio	Venta con valorización por clasificación y triturado (A2)
Metal	Venta con valorización por clasificación y compactación (A2)
Papel y cartón	Venta con valorización por trituración y prensado (A2)
Orgánicos	Compostaje (A3)

CONCLUSIONES

La metodología TOPSIS permitió seleccionar la alternativa más cercana al ideal positivo para cada tipo de residuo, teniendo en cuenta los pesos de los criterios asignados por los expertos. Para los plásticos, vidrio, metal, papel y cartón se estableció que la valorización (véase tabla 8) es la mejor alternativa, debido a los beneficios ambientales y sociales.

Específicamente, para el caso de los residuos orgánicos, correspondientes al 63% del peso de todos los residuos del municipio, el compostaje se convierte en una alternativa atractiva, no solo por los resultados del estudio TOPSIS, sino también por el volumen generado (20.8 m³) y por el alto porcentaje de carbono y nitrógeno (véase tabla 6). De acuerdo con los criterios ambientales (C1), económicos (C2) y sociales (C4), dos de las alternativas evaluadas tuvieron el mismo peso: lombricultura y compostaje; no obstante, el criterio técnico (C3) permitió establecer que el compostaje es la mejor alternativa.

REFERENCIAS

- Achillas, C., Moussiopoulos, N., Karagiannidis, A., Baniyas, G., y Perkoulidis, G. (2013). The use of multi-criteria decision analysis to tackle waste management problems: a literature review. *Waste Management & Research*, 31(2), 115-129. doi: 10.1177/0734242X12470203
- Alcaldía Municipal de Muzo. (2013). *Informe gestión integral de residuos*. Muzo, Colombia: Alcaldía de Muzo.
- Alcaldía Municipal de Muzo. (2016). *Plan de desarrollo. Más para Muzo 2016-2019*. Recuperado de <http://www.muzo-boyaca.gov.co/metas-objetivos-e-indicadores/plan-de-desarrollo-mas-para-muzo-2016--2019>
- Alcaldía municipal de Muzo. (2018). *Informe de gestión*. Recuperado de <http://www.muzo-boyaca.gov.co/informes/informe-de-gestion--vigencia-2018->
- Chen, S., y Hwang, C. (1992). *Fuzzy multi attribute decision making* (Lecture Notes in Economics and Mathematical System, vol. 375). EE. UU.: Springer-Verlag. doi: 10.1007/978-3-642-46768-4
- Coban, A., Ertis, I., y Cavdaroglu, N. (2018). Municipal solid waste management via multi-criteria decision making methods: A case study in Istanbul, Turkey. *Journal of Cleaner Production*, 180, 159-167. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.01.130
- Departamento de Planeación Nacional. (2016). Conpes 3874. Política nacional para la gestión integral de residuos sólidos. Recuperado de <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3874.pdf>
- Departamento Nacional de Estadísticas. (2005). Censo nacional 2005. <http://www.dane.gov.co/files/censos/libroCenso2005nacional.pdf>.

- Díaz, L., y Gallego, L. (2016). *Propuesta para el manejo y disposición de los residuos sólidos generados en el municipio de Muzo, Boyacá* (tesis de pregrado). Programa de Ingeniería Química, Facultad de Ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá D. C., Colombia.
- Ekmekçioglu, M., Kaya, T., y Kahraman, C. (2010). Fuzzy multicriteria disposal method and site selection for municipal solid waste. *Waste Management*, 30(8-9), 1729-1736. doi: 10.1016/j.wasman.2010.02.031
- Estay-Ossandon, C., Mena-Nieto, A., y Harsch, N. (2018). Using a fuzzy TOPSIS-based scenario analysis to improve municipal solid waste planning and forecasting: a case study of Canary archipelago (1999–2030). *Journal of Cleaner Production*, 176, 1198-1212. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.10.324
- García-Cascales, M., y Lamata, M. (2010). Nueva aproximación al método TOPSIS difuso con etiquetas lingüísticas. En *ESTYLF, XV Congreso Español sobre Tecnologías y Lógica Fuzzy*. Ponencia presentada en España.
- Heidari, R., Yazdanparast, R., y Jabbarzadeh, A. (2019). Sustainable design of a municipal solid waste management system considering waste separators: a real-world application. *Sustainable Cities and Society*, 47, 101457. doi: 10.1016/j.scs.2019.101457
- Hwang, C., y Yoon, K. (1981). *Methods for multiple attribute decision making*. In *Multiple attribute decision making* (Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, vol. 186). EE. UU.: Springer-Verlag. doi: 10.1007/978-3-642-48318-9
- Icontec. (2003). *Guía técnica colombiana GTC 86. Guía para la implementación de la gestión integral de residuos-GRI*. Bogotá D. C.: Icontec.
- Icontec. (2004). *Guía técnica colombiana CTC 53-2. Gestión ambiental. Residuos sólidos. Guía para el aprovechamiento de plásticos*. Bogotá D. C.: Icontec.
- Icontec. (2013). *Norma técnica colombiana NTC 6029. Abonos o fertilizantes. Muestreo en almacenes*. Bogotá D. C.: Icontec.
- Kaliszewski, I., y Podkopaev, D. (2016). Simple additive weighting—A metamodel for multiple criteria decision analysis methods. *Expert Systems with Applications*, 54, 155-161. doi: 10.1016/j.eswa.2016.01.042
- Kharat, M., Murthy, S., Kamble, S., Raut, R., Kamble, S., y Kharat, M. (2018). Fuzzy multi-criteria decision analysis for environmentally conscious solid waste treatment and disposal technology selection. *Technology in Society*, [s. d.]. doi: 10.1016/j.techsoc.2018.12.005
- Kutlu, A., y Ekmekçioglu, M. (2012). Fuzzy failure modes and effects analysis by using fuzzy TOPSIS-based fuzzy AHP. *Expert Systems with Applications*, 39(1), 61-67. doi: 10.1016/j.eswa.2011.06.044
- Soltani, A., Hewage, K., Reza, B., y Sadiq, R. (2015). Multiple stakeholders in multi-criteria decision-making in the context of municipal solid waste management: a review. *Waste Management*, 35, 318-328. doi: 10.1016/j.wasman.2014.09.010
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2018). *Informe de disposición final de residuos sólidos—2017*. Bogotá D.C.: Superservicios y DPN.
- Wibowo, S., y Deng, H. (2015). Multi-criteria group decision making for evaluating the performance of e-waste recycling programs under uncertainty. *Waste Management*, 40, 127-135. doi: 10.1016/j.wasman.2015.02.035
- Zadeh, L. (1975). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—I. *Information Sciences*, 8(3), 199-249. doi: 10.1016/0020-0255(75)90036-5