



## GESTIÓN SOSTENIBLE DE LOS RESIDUOS MUNICIPALES (RM) MEDIANTE HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS MULTICRITERIO

Blanco Pérez, Guillermo<sup>1</sup>; Jato-Espino, Daniel<sup>2</sup>; Lobo, Amaya<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Ingeniería Ambiental (GIA), Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Cantabria, Av. de los Castros 44, 39005, Santander, España, guillermo.blancop@alumnos.unican.es, amaya.lobos@unican.es

<sup>2</sup> Grupo de Investigación de Tecnología de la Construcción (GITECO), Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Cantabria, Av. de los Castros 44, 39005, Santander, España, daniel.jato@unican.es

### Resumen

La magnitud que ha alcanzado la generación de residuos en el conjunto de nuestras sociedades hace necesaria la búsqueda de estrategias de gestión que respondan a la protección de la salud humana y del medio ambiente de forma sostenible. Para ello, deben considerarse de forma conjunta una serie de criterios económicos, ambientales y sociales que caracterizan la gestión de RM. El planteamiento de nuevas propuestas de gestión de los RM puede comenzar con un diagnóstico detallado de la situación actual siguiendo dichos criterios. Basado en dicho diagnóstico se pueden proponer diferentes alternativas, modificando los sistemas existentes de reducción, recogida, tratamiento y destino final de los RM. Este artículo presenta una combinación de los métodos de análisis multicriterio AHP (*Analytic Hierarchy Process*) y TOPSIS (*Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*) para evaluar el conjunto de estrategias de gestión de RM resultante en base a los criterios de sostenibilidad seleccionados. El primero de ellos interviene en la ponderación de los criterios, mientras que la aplicación del segundo da lugar al ranking de las alternativas de acuerdo a su valoración en relación a los criterios ponderados. Su aplicación al caso de estudio del Área de Gestión de Mirabel (Extremadura) demostró la clarividencia que proporciona la metodología propuesta a la hora de seleccionar líneas de actuación sostenibles para mejorar la gestión de los RM.

**Palabras clave:** AHP, análisis multicriterio, gestión de residuos municipales, sostenibilidad, TOPSIS

### 1. Introducción

Las políticas ambientales son unas de las herramientas cada vez más empleadas en el conjunto de las sociedades desarrolladas del mundo. Esto es, entre otras causas, debido a la magnitud que ha alcanzado la generación de Residuos Municipales (RM), cuyo final en muchos casos está siendo en los vertederos. La gestión adecuada de los RM puede conducir a un desenlace positivo de estas políticas ambientales.

En este contexto, el presente documento tiene por objeto la propuesta de mejoras para la optimización del aprovechamiento de los RM en el Área de Gestión de Mirabel (Extremadura), según la denominación por parte de la Junta de Extremadura en su Plan Integrado de Residuos de Extremadura (Consejería de Industria, Energía y Medio Ambiente, 2009). Según datos del Instituto Nacional de Estadística (INE, 2016), el número de habitantes que acogía este área de gestión ascendía a 145.155, correspondiente a un total de 95 municipios.

El análisis contempla las corrientes que son objeto de gestión por parte de la empresa pública GESPESA (Gestión y Explotación de Servicios Públicos Extremeños, S.A.U.), gestora encargada de la explotación de los ecoparques y sus instalaciones de transferencia de residuos asociada. El análisis realizado se basa en los datos sobre RM llegados a dichas instalaciones. De esta forma, son objeto de este estudio los

residuos incluidos en la fracción resto y de envases ligeros, quedando fuera del análisis los contenedores de la fracción papel-cartón y envases de vidrio.

## 2. Metodología

La metodología seguida en el presente estudio abarca la descripción detallada de la situación actual de gestión en el área de Mirabel, esto es, la descripción de la generación y composición de los RM y los sistemas de recogida y transporte hasta los tratamientos de los mismos. En base a estos datos, se plantean las alternativas de gestión cuyo objetivo es proponer mejoras en la gestión de los residuos, evaluadas mediante una metodología de análisis multicriterio.

La generación anual de RM se situó en 2015 en Extremadura en torno a los 478 kilogramos por habitante, habiendo crecido su producción en 2014 por primera vez desde que se inició el descenso en 2008 debido a la crisis económica. En la Tabla 1 se analizan las cantidades que llegan al Ecoparque de Mirabel, a partir de los datos de 2015 proporcionados por la empresa gestora GESPEA.

**Tabla 7. Residuos Municipales tratados en el Ecoparque de Mirabel**

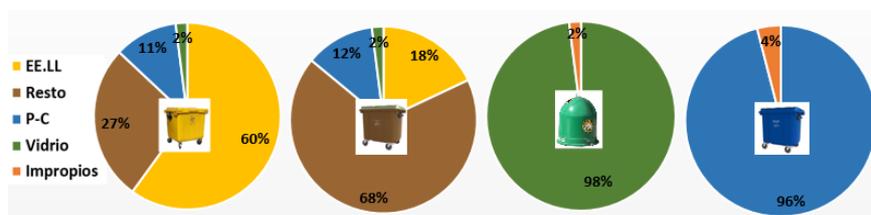
Tipo de residuo	Cantidad (Tn)
Fracción resto	46493,690
Voluminosos	3116,660
Residuos de particulares	1325,000
Envases ligeros	1712,980
TOTAL	52648,330

En el caso de los residuos depositados en el contenedor de vidrio y papel-cartón (Tabla 2), se ha considerado el valor de kg/habitante\*año proporcionado en el Plan Integrado de Residuos de Extremadura (Junta de Extremadura, 2015). Y teniendo en cuenta que la población en 145.155 habitantes (INE, 2016).

**Tabla 8. Cantidades generadas en el Área de Gestión de Mirabel**

Tipo de residuo	Ratio Extremadura (kg/hab-año)	Cantidad generada en el Área de Gestión de Mirabel (Tn)
Papel-Cartón	10,9	1582,200
Vidrio	7,2	1045,100

Con la información acerca de las cantidades generadas en el área de Mirabel y su composición media (Figura 1), se puede analizar la pureza y eficiencia (Tabla 3) de los contenedores, con el objetivo de analizar el sistema de recogida.



**Figura 1. Composición media de los residuos generados en el Área de Gestión de Mirabel**

**Tabla 9. Pureza y eficiencia de los contenedores de Mirabel**

	Papel-Cartón	Vidrio	EE.LL	Resto
Pureza (%)	96,2	98,4	60	-
Eficiencia (%)	19,8	46,5	10	-

La caracterización de los residuos se ha realizado una vez descargados los residuos en las playas de descarga correspondientes, a excepción del contenedor de vidrio y papel-cartón, gestionado fuera de las instalaciones de Mirabel.

El conjunto de residuos que son recogidos en el Área de Gestión de Mirabel llegan hasta el Ecomarque de Mirabel, que cuenta con las siguientes instalaciones principales:

- Línea de fracción resto: Planta de TMB (traje y bioestabilización).
- Línea de envases ligeros: Planta de clasificación de envases.
- Rechazo: Vertedero.

De las tres instalaciones anteriores se conocen los rendimientos en la recuperación de materiales, así como las pérdidas producidas durante los tratamientos y los rechazos que generan las plantas, que acabarán depositados en vertedero. Estos datos se han analizado y cuantificado con el objeto de comprobar los objetivos propuestos por el PIREX (2016-2022) y PEMAR (2016-2022).

Los principales objetivos y medidas del PIREX 2016-2022, son los siguientes:

- A) Minimización: Antes de 2020, los RM generados deben ser como máximo el 90% de los RM generados en 2010.
- B) Valorización: Antes de 2020, alcanzar la valorización del 15% de los RM generados.
- C) Eliminación: El 16 de julio de 2016 no se ha debido de superar la cantidad de 74.761 tn RM biodegradables destinados a vertedero. Además, para 2020 debe limitarse el vertido total de los RM generados al 35 %.

Los objetivos de reciclado y valorización marcados en el PEMAR (Ministerio de Agricultura, 2015) y considerados en este estudio son del 50% en metales, del 22,5% en plástico y del 15% en madera.

El análisis del Área de Gestión de Mirabel mostró el incumplimiento de la totalidad de estos objetivos en la actualidad, demandando una modificación en la gestión actual de los RM. Para conseguir este propósito, se han planteado un conjunto de alternativas al sistema de gestión vigente:

- Alternativa 1 (Situación actual): se refiere a la situación descrita en el diagnóstico de la situación actual, de manera que pueda emplearse como referencia para el resto de alternativas.
- Alternativa 2: potenciar la separación en origen mediante la realización de campañas de sensibilización y educación acerca de buenas prácticas en el reciclaje y reutilización.
- Alternativa 3: realización de campañas de sensibilización y educación acerca del reciclado y reutilización, acompañadas de mejoras en las instalaciones existentes, tanto de la planta de clasificación de EE.LL como de la planta de TMB.
- Alternativa 4: introducción de un 5º contenedor (materia orgánica) en las poblaciones con mayor número de habitantes (7 municipios), potenciada con campañas de sensibilización y educación acerca del reciclaje. Optimización de la introducción del contenedor que recoge separadamente la M.O. con la instalación de una planta de compostaje en Mirabel.
- Alternativa 5: instalación de una planta Incineradora capaz de dar servicio a toda Extremadura con ubicación prevista en el Ecomarque de Mérida.
- Alternativa 6: combinación de la alternativa 3 y la alternativa 4.
- Alternativa 7: combinación de la alternativa 3 y la alternativa 5.

En la Tabla 4 se muestran los diferentes criterios y subcriterios considerados para describir cada una de las alternativas anteriormente descritas. Los criterios económicos se han cuantificado siguiendo la *“Guía para la implantación de la recogida separada y gestión de biorresiduos de competencia municipal”* (Ministerio de Agricultura y Medio Ambiente, 2013) y el informe elaborado por la Comisión Europea *“Costs for Municipal Waste Management in the EU”* (Hogg, 2001). La valoración ambiental ha sido obtenida a partir del informe *“Waste Management Options and Climate Change”* (Smith & otros, 2001). Por otro lado, para la valoración del subcriterio de aceptación social se ha recurrido a encuestas realizadas a habitantes de los municipios afectados. Por último, como subcriterio de adaptabilidad, se ha considerado la aceptación de estas a los ciudadanos de forma directa, siendo las alternativas de mayor dificultad de adaptación las que consideran la introducción del 5º contenedor de materia orgánica y la realización de campañas de sensibilización.

Tabla 4. Criterios y subcriterios considerados en la descripción de las alternativas

CRITERIO	SC#i	SUBCRITERIO	UNIDADES
ECONÓMICO (E)	E.1	Coste de inversión	€/año
	E.2	Coste de recogida y transporte urbano	€/año
	E.3	Coste de transporte interurbano	€/año
	E.4	Coste de tratamiento	€/año
	E.5	Recuperación en tratamiento	€/año
AMBIENTAL (A)	A.1	Emisiones atmosféricas durante transporte	kg CO <sub>2</sub> eq./año
	A.2	Emisiones atmosféricas durante tratamiento	kg CO <sub>2</sub> eq./año
	A.3	Contaminación de aguas	L/año
SOCIAL (S)	S.1	Generación de empleo	Nº empleados
	S.2	Cumplimiento de objetivos	Puntuación
	S.3	Grado de aceptación social	Puntuación
	S.4	Adaptabilidad	Puntuación

La definición de estos subcriterios permite la realización de la matriz de decisión (Tabla 5), formada por 7 alternativas definidas por 3 criterios (económico, ambiental y social).

Tabla 5. Matriz de decisión

Alternativa	Económico	Ambiental		Social			
	Coste (€/año)	Emisiones atm. (KgCO <sub>2</sub> eq./año)	Contaminación agua (L/año)	Empleo (Trabajos/1000t)	Objetivos (%)	Aceptación (1-5)	Adaptabilidad (%)
A1	13.979.990	14.666.162	629.274	66	0	3,287	3,6
A2	14.058.833	14.230.189	606.438	72	25	3,287	8,7
A3	16.234.788	8.890.343	515.647	79	50	3,287	8,7
A4	14.598.349	12.818.958	585.446	76	25	3,475	33,3
A5	23.087.286	6.846.079	314.637	67	50	3,232	3,6
A6	16.569.346	7.848.464	501.835	82	62,5	3,475	33,3
A7	25.263.031	5.860.169	257.823	81	100	3,232	8,7
<b>Pesos</b>	<b>1</b>	<b>0,355</b>	<b>0,645</b>	<b>0,412</b>	<b>0,24</b>	<b>0,173</b>	<b>0,174</b>

Una vez construida la matriz de decisión, es necesario dar los pesos a cada uno de los subcriterios. Los económicos se han englobado en un único subcriterio, ya que tienen las mismas unidades, mientras que para determinar los pesos de los subcriterios ambientales y sociales se han realizado encuestas cuyos resultados se han homogeneizado mediante el método de Agregación basado en Similaridades (DBW). Las encuestas contemplaban los diferentes criterios enfrentados y el encuestado tenía que valorar la importancia de uno respecto al otro.

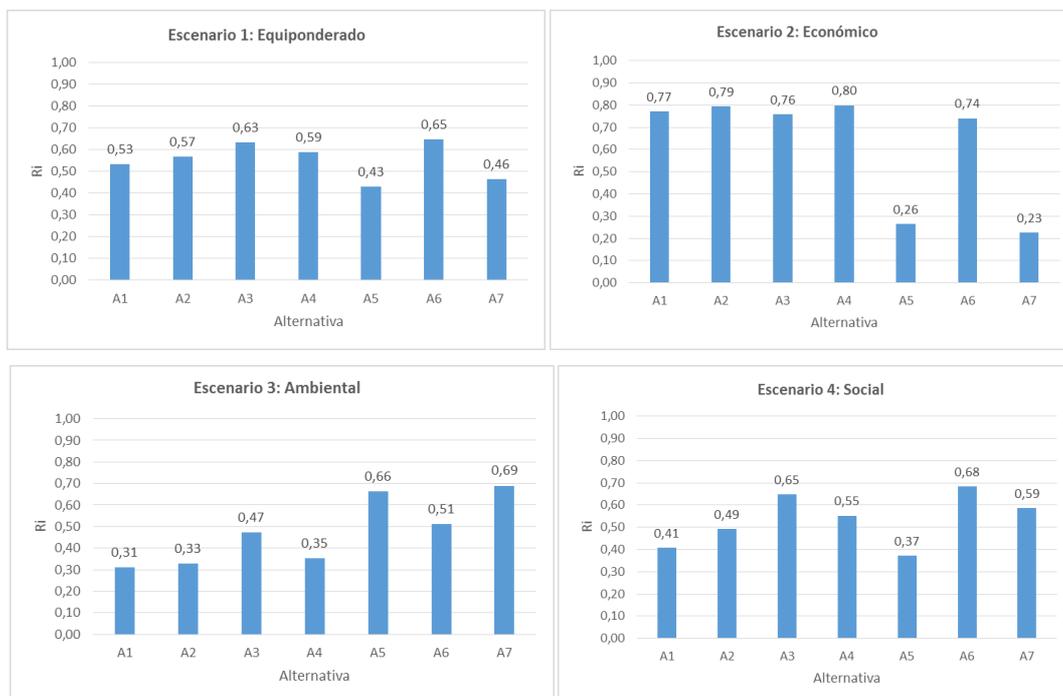
Una vez homogeneizado el resultado de las encuestas, se emplea el método AHP (Analytic Hierarchy Process) para determinar los pesos en función de su importancia relativa con respecto a los otros subcriterios. Finalmente, se aplica el método TOPSIS. La matriz de decisión se normaliza, se pondera por los pesos, se calculan las distancias a la Solución Ideal positiva y la negativa y, finalmente, la cercanía de cada propuesta a la solución ideal  $R_i$  (valor comprendido entre 0 y 1, siendo la unidad la solución ideal). Este método se aplica en 5 escenarios diferentes: equilibrado, importancia económica, importancia ambiental, importancia social y basado en encuestas.

Los escenarios planteados permiten, en la valoración de las alternativas, enfocar esta toma de decisión desde distintos puntos de vista (económico, ambiental o social). De esta forma, se exponen 5 escenarios

diferentes, mostrando la gran utilidad de la metodología descrita, pudiéndose adaptar a los recursos o necesidades en cada momento de las entidades o empresas que deseen emplear el análisis multicriterio.

### 3. Resultados y discusión

En la Figura 2 se muestra el ranking de alternativas según el escenario analizado. Con la preponderancia del criterio económico se ve cómo actuaciones sencillas como la realización de campañas de sensibilización que mejoren la recogida en origen serían de gran beneficio. Si se considera elevar los costes de inversión, las soluciones podrían ser dos: la implantación del 5º contenedor de materia orgánica, que repercutiría en la separación de los residuos en origen y, por otro lado, la mejora de las plantas existentes, mejorando los rendimientos de recuperación de materiales. Cuando se da un mayor peso al criterio ambiental, los resultados son contrarios al escenario anterior. Así, predominan las alternativas que contemplan la construcción de una incineradora en Extremadura, alcanzándose unas mejoras ambientales importantes respecto a la situación actual al reducirse las emisiones atmosféricas y los residuos que van a parar a vertedero. La desventaja de esta solución radica en el alto coste económico que supone esta instalación. Desde el punto de vista social, los resultados llevan a una modernización de las plantas existentes, e incluso a su combinación con la introducción del contenedor de recogida selectiva de materia orgánica, siendo una solución en la línea con el escenario económico. Finalmente, se han analizado dos escenarios: uno equilibrado y otro basado en la preferencia de los criterios por parte de los habitantes de la zona. En estos dos escenarios predominan las alternativas que mejoran la recuperación de materiales en las plantas existentes y la combinación con la implantación del 5º contenedor de recogida selectiva de materia orgánica.



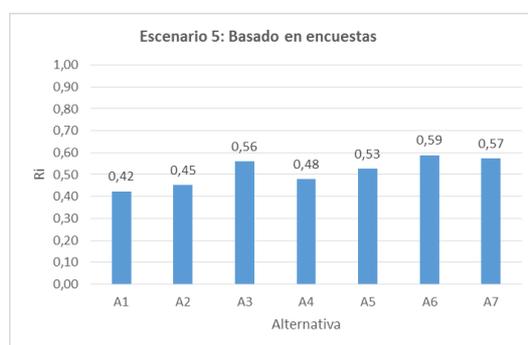


Figura 2. Ranking de las alternativas según los 5 escenarios

#### 4. Conclusiones

El presente estudio plantea diferentes alternativas a la gestión actual de los residuos municipales en el Área de Gestión de Mirabel, apoyándose para ello en la utilización de herramientas multicriterio que consideren en el mismo análisis la respuesta de cada propuesta a criterios de sostenibilidad económicos, ambientales y sociales. Con ese fin, se emplea una combinación de los métodos de análisis multicriterio AHP (Analytic Hierarchy Process) y TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) en base a los criterios de sostenibilidad mencionados.

En primer lugar, hay que destacar la variabilidad de resultados que se producen según el escenario planteado, observándose la dificultad de alcanzar una solución única que satisfaga todos los escenarios. Tras el análisis, se deduce que la situación actual se encuentra alejada de una gestión óptima de los residuos, justificándose moderadamente este modelo actual únicamente por cuestiones económicas. Sin embargo, se puede observar la deficiencia desde el punto de vista ambiental y social.

En base a estas consideraciones, se concluye que una solución conveniente pasa por potenciar la separación en origen y eficiencia de los contenedores, de manera que se alcance una mayor recuperación de materiales en los residuos municipales. Esto se alcanzaría aumentando las campañas de sensibilización y educación acerca de buenas prácticas en el reciclaje y reutilización. Pero además, se hace necesario una inversión en la mejora de las instalaciones existentes o la introducción de nuevos tratamientos que mejoren la recuperación de materiales, repercutiendo en los beneficios económicos derivados y la reducción de los vertidos. Como último cambio respecto a la situación actual, se debe tener en cuenta la posibilidad de modificar el tipo de recogida de residuos, pasando de un sistema de recogida de 4 contenedores a otro con 5 fracciones (introduciendo el contenedor de materia orgánica en determinados municipios del Área de Gestión de Mirabel).

Por último, la metodología desarrollada en este documento puede ser empleada en otras regiones, debido a la amplitud de aplicación de los criterios y subcriterios empleados. Por tanto, los resultados de este estudio constituyen una gran contribución a los organismos encargados de la gestión de los RM. Como principal línea de investigación futura, esta amplitud de aplicación de los criterios hace pensar en la posibilidad de automatizar el análisis descrito en este documento mediante un software.

#### Referencias

- Consejería de Industria, Energía y Medio Ambiente, J. d. E., 2009. Plan Integral de Residuos de Extremadura (PIREX) 2009-2015. s.l.:s.n.
- Hogg, D., 2001. Costs for Municipal Waste Management. Comisión Europea., s.l.: s.n.
- INE, I. N. d. E., 2016. Demografía y Población (<http://www.ine.es/>). [En línea] [Último acceso: 2016].
- Junta de Extremadura, C. d. A. D. R. M. A. y. E., 2015. extremambiente.gobex. [En línea] Available at: [http://extremambiente.gobex.es/index.php?option=com\\_content&view=article&id=2238&Itemid=578](http://extremambiente.gobex.es/index.php?option=com_content&view=article&id=2238&Itemid=578)

- Ministerio de Agricultura y Medio Ambiente, 2013. Gestión de biorresiduos de competencia municipal. Guía para la implantación de la recogida separada y tratamiento de la fracción orgánica, s.l.: s.n.
- Ministerio de Agricultura, A. y. M. A., 2015. Plan Estatal Marco de gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022. s.l.:s.n.
- Smith, A. & otros, y., 2001. Waste Management Options and Climate Change. Final report to the European Commission, DG Environment., s.l.: s.n.