

CONAMA 2024

CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

Residuos Urbanos

Matriz Inteligente para Decidir
Sistemas de Recogida Neumática de
Residuos



CONAMA 2024

MATRIZ INTELIGENTE PARA DECIDIR SISTEMAS DE RECOGIDA NEUMÁTICA DE RESIDUOS

Autor Principal: Óscar Molina Jorge (ENVAC IBERIA, S.A. y Universidad Europea de Madrid)

Otros autores: María-José Terrón López (Universidad Europea de Madrid); Ricardo Latorre Dardé (Universidad Europea de Madrid).

1. Introducción y OBJETIVOS.....	1
1.1. Objetivo Principal.....	2
1.2. Objetivos Específicos.....	2
2. Metodología.....	3
2.1. Población y muestra.....	3
2.2. Variables del estudio.....	4
2.3. Diseño de la encuesta	5
2.4. Matriz de decisión.....	7
3. Resultados.....	8
3.1. Resultados de la Magnitud (M) de la Variable en la matriz de decisión y su Impacto respecto a los ODS.....	8
3.2. Cálculo de la Matriz de decisión	9
3.3. Algoritmos de cálculo.....	9
4. Conclusiones	14
Bibliografía	15

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Históricamente, la gestión de los residuos ha sido una preocupación importante para las autoridades locales, debido a su impacto en la salud pública y el medio ambiente (Asefi & Lim, 2017; Chàfer, Sole-Mauri, Solé, Boer, & Cabeza, 2019; Eurostat, 2024; Khan & Faisal, 2008; Laso, et al., 2019; Miller, Spertus, & Kamga, 2014; Pires, Martinho, & Chang, 2011; Redacción EFEverde, 2017). Actualmente, la gestión de los residuos es un problema sistémico con grandes implicaciones que van más allá de la preocupación medioambiental, afectando también al desarrollo económico local, las desigualdades sociales, la participación comunitaria (Diario Oficial de la Unión Europea, 2018), la contaminación terrestre y marina y otros factores que afectan de manera directa en los ecosistemas urbanos (Voukkali, Papamichael, Loizia, & Zorpas, 2024). Estas afecciones están en constante evolución por lo que las soluciones tienen que ir adaptándose a la, así, según el informe del Banco Mundial *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050* (Kaza, Yao, Bhada-Tata, & Van Woerden, 2018), muchas ciudades no cuentan con sistemas adecuados para adaptarse a los cambios en la gestión de residuos sólidos.

En respuesta a esta problemática, este artículo presenta una matriz de decisión diseñada específicamente para evaluar actualmente y evolucionar a medida que se vaya adquiriendo mayor conocimiento, la conveniencia de implantación de los Sistemas de Recogida Neumática de Residuo Sólido Urbano (SRNRSU) (Dotsenko & Babaev, 2023; ENVAC Group, 2024; Farré, Mateu, Teixidó, & Cabeza, 2023; Mordor Intelligence, 2023). Esta herramienta no solo facilita la toma de decisión de implantación de estos sistemas, sino que también contribuye a una planificación más eficiente en la gestión de residuos en entornos urbanos (Voukkali, Papamichael, Loizia, & Zorpas, 2024).

La matriz de ayuda a la toma de decisión guía la implementación de los SRNRSU tanto en nuevos desarrollos urbanos como en áreas urbanas consolidadas, dotando dichos entornos de una herramienta altamente sensorizada tan demandada en la nueva visión de las ciudades inteligentes del futuro (Alvarado López, 2017; Voukkali, Papamichael, Loizia, & Zorpas, 2024). Esta sensorización permite una exhaustiva recopilación de datos, analizando las ventajas y desventajas de estos sistemas desde una perspectiva técnica, económica y social. Esta herramienta aborda la complejidad de la evaluación de la viabilidad técnica, económica y social de los SRNRSU, y la alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas (United Nations, 2023). La metodología empleada para determinar la efectividad de la herramienta incluye encuestas a usuarios de los sistemas y técnicos competentes que aportan evaluación de expertos y el desarrollo de una matriz que cruza variables específicas con los ODS, lo que proporciona de manera efectiva una respuesta de conveniencia de implantación de un SRNRSU. Estos sistemas pueden integrarse en el contexto de las SMART CITY (Alvarado López, 2017; Voukkali, Papamichael, Loizia, & Zorpas, 2024) sin perder de vista los objetivos de sostenibilidad (Costi, Minciardi, Robba, Rovatti, & Sacile, 2004).

1.1. Objetivo Principal

El desarrollo de la matriz de decisión tiene como objetivo guiar la selección de conveniencia de implantación de los SRNRSU en los proyectos de ciudades inteligentes, ya que esta matriz establece una primera aproximación en el proceso de toma de decisiones (Molina-Jorge, Terrón-López, & Latorre-Dardé, 2024). No obstante, el presente artículo busca perfeccionar esta herramienta, afinando la decisión especialmente en aquellos casos en los que los resultados de la matriz se sitúan en un margen cercano al $\pm 10\%$ del umbral que determina la conveniencia o no de la implantación de estos sistemas, afinando con mayor precisión la decisión de implantación, evitando posibles dudas y garantizando una mayor certeza en los proyectos de implantación.

1.2. Objetivos Específicos

Con el fin de alcanzar el objetivo general se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Evitar las desventajas de los sistemas convencionales de recogida de residuos mediante camión por la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), la problemática del tráfico rodado, el ruido y los elevados costos de mano de obra.
- Evaluar los sistemas de recogida neumática de residuos como una alternativa más eficiente que elimina los problemas de los sistemas tradicionales.
- Integrar los sistemas de recogida neumática con los conceptos de ciudades inteligentes, minimizando emisiones de GEI, reduciendo el ruido y optimizando el uso del espacio urbano.
- Comparar los costes de implantación y operación de los sistemas neumáticos frente a los sistemas convencionales, destacando los elevados costes iniciales para su

implantación y los beneficios a largo plazo en términos de eficiencia, reducción de personal y vehículos.

- Considerar factores geográficos, demográficos y operativos para determinar la viabilidad de implantación.
- Exponer las ventajas estéticas y operativas de los sistemas de recogida neumática por la prestación de un servicio continuo las 24 horas del día los 365 días del año.

2. METODOLOGÍA

Para alcanzar los objetivos propuestos, se empleó una metodología holística que integra todas las fases de un proceso de investigación, comenzando con la recopilación de datos para su posterior análisis e interpretación. Esta metodología además de facilitar la obtención de información precisa también demuestra la aplicabilidad de los resultados, aportando valor en la toma de decisión, reforzando la utilidad de la matriz creada convirtiéndola en una herramienta valiosa y práctica para evaluar las tecnologías en distintos contextos (Costi, Minciardi, Robba, Rovatti, & Sacile, 2004).

2.1. Población y muestra

Para alcanzar el objetivo propuesto la primera tarea consistió en escoger los municipios donde se recogerían los datos. La recopilación de datos debería ser sencilla y deberían coexistir los sistemas de recogida neumática de residuos urbanos con la recogida tradicional por camión. Los municipios seleccionados fueron San Vicente de Barakaldo y Portugalete, cada uno con dos instalaciones, y Bilbao, Galdakao, y Llodio, cada uno con una única instalación, lo que hace un total de 7 instalaciones que da servicio a 56.000 viviendas (Molina-Jorge, Terrón-López, & Latorre-Dardé, 2024).

Según el Instituto Nacional de Estadística de España el promedio de individuos en los hogares a 1 de enero de 2023 es de 2,48; sin embargo, según la media en el País Vasco donde pertenecen los municipios estudiados, es de 2,36 personas por vivienda, un tanto inferior a la media española (INE, 2023). El total de usuarios a los que se presta servicio con la recogida neumática de residuos urbanos en el objeto de la investigación es de 132.160 individuos.

Se calculó el tamaño de la muestra para alcanzar un nivel de confianza del 95 %, manteniendo un margen de error del 8 % (Martínez Bencardino, 2012). La metodología empleada para el cálculo de la muestra en una población finita considera la ecuación estadística [Ecuación 1]. El resultado establece 150 encuestas como requisito mínimo para obtener datos con una fiabilidad estadística adecuada.

$$\text{Tamaño de la muestra} = \frac{\frac{z^2 \cdot p \cdot (1 - p)}{e^2}}{1 + \left(\frac{z^2 \cdot p \cdot (1 - p)}{e^2 \cdot N}\right)}$$

Ecuación 1. Ecuación para el cálculo de la muestra en una población finita

Donde:

z: Desviación estándar de la distribución normal utilizado para determinar el nivel de confianza deseado en el estudio. Según la experimentación su valor es de 1,96 para un nivel de confianza del 95% [Cuadro 1].

Cuadro 1. Valor de la desviación estándar según el nivel de confianza deseado

Nivel de confianza deseado	Puntuación z
80%	1,28
85%	1,44
90%	1,65
95%	1,96
99%	2,58

Fuente: SurveyMonkey

p: Probabilidad de que SI ocurra el evento estudiado (50%).

1 – p: Probabilidad de que NO ocurra el evento estudiado (50%).

e: Margen de error asumido en el estudio que representa la incertidumbre de los resultados (8%).

N: Tamaño total de la población. 132.160 usuarios.

En la investigación se realizaron 166 encuestas, 151 se dirigieron a usuarios de los sistemas de recogida neumática y 15 a técnicos especializados en el funcionamiento de los sistemas más representativos para la gestión de residuos urbanos.

2.2. Variables del estudio

Las variables de la investigación se pueden actualizar en función de las particularidades regionales y/o de los nuevos avances tecnológicos y/o ambientales (Molina-Jorge, Terrón-López, & Latorre-Dardé, 2024). Así las variables analizadas en la investigación fueron (Kharat, et al., 2019):

- Coste y molestia de implantación.
- Evaluar el coste del servicio en explotación y ver su operatividad por inclemencias (nieve, lluvia, etc.).
- Calidad del residuo selectivo en base a las caracterizaciones (Peñuelas Menéndez, Ortiz Ots, Gómez Barbero, & Berbel Vecino, 2001).
- Emisiones de CO₂ y gases contaminantes y de efecto invernadero.
- Economía circular (Farré, Llantoy, Chàfer, Gómez, & Cabeza, 2022; Garcia-Herrero, et al., 2018).

- Afección de los sistemas de recogida con la movilidad y el tránsito en las ciudades (Transit Oriented Development - TOD). Reducción del tráfico pesado (Ortuño Padilla, 2013; Ortuño Padilla, Fernández Morote, & Fernández Aracil, 2017).
- Niveles de ruido producidos.
- Calidad del servicio, así como molestias por la implantación y explotación.
- Calidad de vida, seguridad y servicio al ciudadano.
- Emisión de olores, lixiviados desprendidos, limpieza de la vía pública y entorno medioambiental.
- Afección al empleo.
- Información y seguimiento del residuo en tiempo real (pesaje, usuario, hábito, etc.) con posibilidad de implementar el pago por generación (Pay as you throw).
- Integración de los sistemas de recogida en las SMART CITY (Alvarado López, 2017; Voukkali, Papamichael, Loizia, & Zorpas, 2024). Sensorización y digitalización en la operatividad de los sistemas.
- Disponibilidad del sistema 24/7/365.
- Resiliencia de los sistemas de recogida ante las huelgas.
- Aceptación ciudadana.
- Vandalismo.
- Desarrollo sostenible y sus pilares básicos (medioambiental, social y económico) [8].
- Ocupación de la vía pública.
- Contacto humano con las fracciones de residuos.

En base a estas variables y con el propósito de obtener datos que permitan validar y mejorar los valores de referencia empleados en la matriz de decisión, se diseñó una encuesta anónima asegurando la confidencialidad de la información recopilada, dirigida a recolectar información sobre las variables de interés. Realizar una investigación empírica resulta fundamental para proveer una base sólida que refuerce dichos valores, ya que ofrece una representación precisa y contextualizada de la realidad dentro de la población objetivo.

2.3. Diseño de la encuesta

Con el fin de respaldar los valores empleados en la matriz de decisión se elaboró una encuesta para validar y legitimar los valores de referencia utilizados en la matriz de decisión.

La encuesta, con un cuestionario que contiene preguntas definidas y de opción múltiple en una escala compuesta por 5 niveles de tipo Likert, verifica de manera empírica las premisas utilizadas en el análisis (Lietz, 2010; Malhotra, 2011), facilitando la interpretación mediante métodos estadísticos (Martínez Bencardino, 2012). Esta herramienta indica el grado de satisfacción o acuerdo con las afirmaciones dadas.

La encuesta, presentada por Molina-Jorge et al. (Molina-Jorge, Terrón-López, & Latorre-Dardé, 2024) se divide en 4 bloques fundamentalmente, el primer bloque o bloque de control recaba información acerca del perfil de los encuestados, el segundo bloque busca la importancia de los

individuos a las variables del estudio [Cuadro 2], el tercero busca el grado de conocimiento de los entrevistados respecto a los sistemas de recogida neumática y finalmente, el cuarto bloque ahonda sobre las preferencias de los individuos a la recogida fraccionada de los residuos de su localidad (Farré, Llantoy, Chàfer, Gómez, & Cabeza, 2022; Garcia-Herrero, et al., 2018; Iriarte, Gabarrell Durany, & Rieradevall, 2009; Khan & Faisal, 2008).

Cuadro 2. Correlación entre las variables del estudio y las cuestiones de la encuesta

Matriz de selección	N.º Pregunta de la encuesta
Coste y Molestia de Implantación	9
Coste Explotación	25
Calidad Selectiva	15
Emisiones CO ₂ y G.E.I.	20 y 21
Economía Circular	18 y 19
TOD	11
Ruido	22
Calidad Vida	14 y 17
Olores	23
Afección Empleo	9, 24 y 25
SMART (Seguimiento, Pesaje Tiempo Real y Pago por Generación)	12, 13
Sistema de Fracciones de residuo favorita	30
Comodidad 24-7-365	14
Afección Huelgas	24
Aceptación ciudadana	8, 28 y 29
Vandalismo	26
Sostenibilidad	16
Ocupación Vía pública	27
Contacto con Residuo	10

Fuente: Elaboración propia

En el Cuadro 3 se enumeran las preguntas de la encuesta donde se ha utilizado una escala de Likert, siendo 1 “nada importante”, “muy insatisfecho” o “nada” y 5 “muy importante”, “muy satisfecho” o “excelente”. Después de cada pregunta, los encuestados tienen la oportunidad de escribir comentarios para proporcionar contexto adicional o detalles sobre sus valoraciones.

Cuadro 3. Números de pregunta de la encuesta mantener

N.º	Pregunta
8	Nivel de satisfacción con el sistema neumático de recogida de residuos sólidos urbanos.
9	En los sistemas neumáticos de recogida de residuos, ¿cree que un mayor coste de implantación compensa un menor coste operativo?
10	Importancia de reducir el contacto con los residuos para los usuarios y los profesionales de la recogida de residuos.
11	Importancia de reducir la circulación de vehículos dentro de las ciudades.

12	Importancia de los sistemas de recogida de residuos integrados con SMART CITY donde las puertas de los residuos se pueden abrir automáticamente.
13	Importancia de identificación, seguimiento, pesaje y facturación en tiempo real de los residuos eliminados.
14	Importancia en depositar los residuos generados por cualquier ciudadano a cualquier hora del día, cualquier día del año.
15	En qué medida cree que los SRNRSU mejoran la recogida selectiva de residuos.
16	En qué medida cree que los SRNRSU contribuyen a mejorar la sostenibilidad y el medio ambiente.
17	En qué medida cree que los SRNRSU contribuyen a una mejor calidad de vida de las personas.
18	En qué medida cree que los SRNRSU mejoran los patrones de producción y consumo.
19	En qué medida cree que los SRNRSU promueven la economía circular.
20	En qué medida cree que los SRNRSU reducen las emisiones de CO ₂ .
21	En qué medida cree que los SRNRSU reduce las emisiones de gases de efecto invernadero.
22	En qué medida cree que los SRNRSU generan menos ruido durante el proceso de recogida de residuos.
23	En qué medida cree que los SRNRSU reducen los olores en los puntos de eliminación de residuos para los ciudadanos.
24	En qué medida cree que los SRNRSU no se ven afectados por las huelgas de los trabajadores.
25	En qué medida cree que los SRNRSU reducen los costos salariales operativos.
26	En qué medida cree que los SRNRSU están menos expuestos a posibles actos vandálicos que los sistemas de recogida tradicionales.
27	En qué medida cree que los SRNRSU reducen el área de ocupación para la recolección de residuos en la vía pública.

Fuente: Elaboración propia

Estas preguntas tienen como objetivo recopilar opiniones y preferencias de los encuestados respecto a tecnologías (Torkayesh, Malmir, & Asadabadi, 2021) y prácticas innovadoras en la gestión de residuos.

2.4. Matriz de decisión

La matriz de decisión es la herramienta creada en el curso de la investigación (Leopold, Clarke, Hanshaw, & Balsley, 1971; Molina-Jorge, Terrón-López, & Latorre-Dardé, 2024), en ella se cruzan las variables del estudio respecto con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas. Su propósito es valorar mediante una evaluación numérica la idoneidad de implementar un sistema de recogida neumática de residuos sólidos urbanos en un municipio específico o en una zona determinada del mismo.

A cada variable del estudio se le asocian dos valores diferentes: Magnitud (M) e Impacto (I). La Figura 1 representa cada celda de la matriz de decisión correspondiente a una variable específica y su relación con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (Torkayesh, Malmir, & Asadabadi, 2021). La Magnitud (M) cuyo valor deriva de los resultados de la encuesta, otorga la amplitud a la variable y se representa en la esquina superior izquierda, mientras que el Impacto (I) que indica la importancia de esta magnitud en relación con los ODS según encuesta de El Ágora, diario del agua (Cáceres, 2020), se representa en la esquina inferior derecha de cada celda.

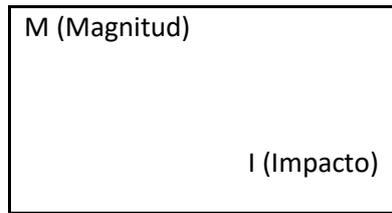


Figura 1. Magnitud de la variable y su impacto respecto al ODS con la cual se mide

3. RESULTADOS

Calculados los valores de la magnitud y el impacto, se alimenta la matriz para decidir si es o no conveniente la implantación de un sistema neumático de recogida de residuos sólidos urbanos en municipio determinado o una de sus áreas.

3.1. Resultados de la Magnitud (M) de la Variable en la matriz de decisión y su Impacto respecto a los ODS

La Magnitud (M) refleja la amplitud de la variable según la percepción de los profesionales encargados de decidir la implantación o no de un sistema de recogida neumática de residuos urbanos. Toma valores entre 1 y 5, donde 1 indica la menor magnitud y 5 la mayor, asignando positivo si es favorable y negativo si es desfavorable. Los valores neutros 3 y -3, tras los cálculos en la matriz de decisión, ayudarán a establecer una línea divisoria para determinar la conveniencia de la implantación del sistema (Molina-Jorge, Terrón-López, & Latorre-Dardé, 2024).

El Impacto (I) refleja la relevancia otorgada al ODS en cuestión, valor constante para un ODS determinado independientemente de la variable analizada. La valoración del impacto carece de aplicabilidad cuando no existe relación directa entre el ODS y la variable evaluada, mientras que en los casos en los que sí existe tal relación, se establecerá un criterio de valoración categorizado como Bajo, Significativo o Alto, asignando los valores numéricos 1, 2 y 3 respectivamente determinados según los percentiles 33 % y 66 % a partir de la encuesta realizada por "El Ágora, diario del agua", medio independiente para la difusión de información y conocimiento sobre el uso y consumo de agua y el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU (Cáceres, 2020). De esta forma, la ausencia de correlación entre el ODS y la variable implica nula afección. Una valoración de 1 indica la presencia de la afección, una valoración de 2 duplica la afección, y una valoración de 3 triplica la magnitud de la afección.

En situaciones de discrepancia y con la debida justificación, si se requiriera cambiar el valor del impacto debido a circunstancias específicas en un área o municipio, esto no tendría una mayor complejidad. Sería necesario, en este caso, actualizar la matriz de referencia con los impactos modificados, manteniendo dicha valoración para determinar la conveniencia o no de implantación del sistema de recogida neumática

Una vez se ha cuantificado el valor de la Magnitud (M) y del Impacto (I), se procede a elaborar la matriz decisión de referencia.

3.2. Cálculo de la Matriz de decisión

Se ha considerado el valor de magnitud 3 ó -3 en todas aquellas variables que tienen relación con algún ODS, valoración intermedia que marca el límite operativo para la conveniencia de implantación y cuyo valor positivo se aplicará en aquellos casos donde la variable ofrece un impacto favorable sobre el ODS y negativo en caso de que el impacto sea desfavorable [Figura 2]. En cuanto al impacto, su valor se aplica según los percentiles 33 % y 66 % calculados por el número de votos emitidos según la encuesta realizada por el medio independiente El Ágora Diario (Cáceres, 2020).

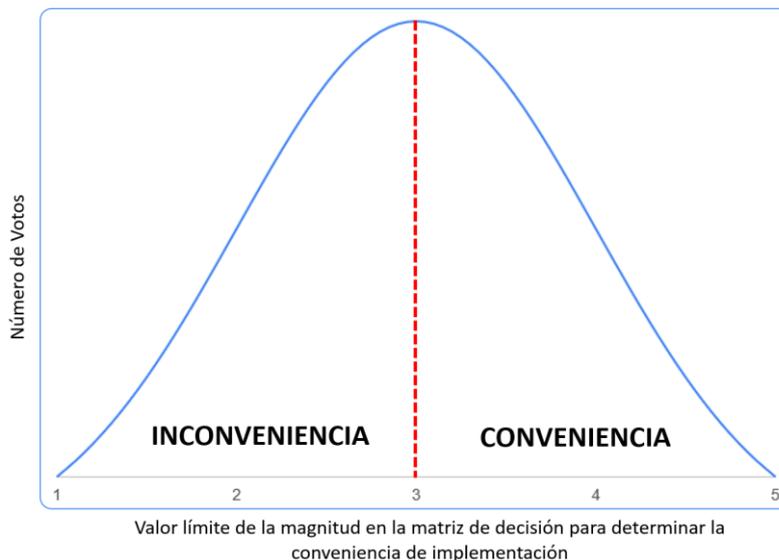


Figura 2. Límite operativo propuesto para la implementación de un SRNRSU

3.3. Algoritmos de cálculo

Para el cálculo de magnitud (M) previamente se debe determinar su signo que depende de la variable con la que se mide. Para ello, se ha decidido que las variables que aporten valor a la sostenibilidad tienen signo positivo, mientras que las que resten valor a la sostenibilidad son de signo negativo. Se entiende por sostenibilidad aquellas variables que conjuguen cualquiera de los tres pilares básicos: económico, social y medioambiental.

Las variables con magnitud positiva son:

- Calidad del residuo selectivo en base a las caracterizaciones.
- Emisiones de CO₂ y gases contaminantes y de efecto invernadero.
- Economía circular.
- Afección de los sistemas de recogida con la movilidad y el tránsito en las ciudades (TOD). Reducción del tráfico pesado (Ortuño Padilla, 2013; Ortuño Padilla, Fernández Morote, & Fernández Aracil, 2017).
- Niveles de ruido producidos.
- Calidad del servicio, así como molestias por la implantación y explotación.
- Calidad de vida, seguridad y servicio al ciudadano.
- Emisión de olores, lixiviados desprendidos, limpieza de la vía pública y entorno medioambiental.
- Afección al empleo.
- Información y seguimiento del residuo en tiempo real (pesaje, usuario, habito, etc.) con posibilidad de implementar el pago por generación (Pay as you throw).
- Integración de los sistemas de recogida en las SMART CITY (Alvarado López, 2017; Voukkali, Papamichael, Loizia, & Zorpas, 2024). Sensorización y digitalización en la operatividad de los sistemas.
- Disponibilidad del sistema 24/7/365.
- Resiliencia de los sistemas de recogida ante las huelgas (Kharat, et al., 2019).
- Aceptación ciudadana.
- Vandalismo.
- Desarrollo sostenible y sus pilares básicos (medioambiental, social y económico).
- Contacto humano con las fracciones de residuos.

Las variables con magnitud negativa son:

- Coste y molestia de implantación.
- Evaluar el coste del servicio en explotación y ver su operatividad por inclemencias (nieve, lluvia, etc.).
- Ocupación de la vía pública.

Se mide cada variable de la investigación con cada uno de los ODS establecidos por Naciones Unidas, en aquellos casos en los que la variable no tenga aplicabilidad con algún ODS, el valor asignado para el cálculo será 0 al no existir afección. En cada celda de la matriz se asigna una magnitud (M) con su signo correspondiente y un Impacto (I) dependiente de la importancia asignada al ODS.

Se multiplica en cada celda el valor de la magnitud por el impacto, y se hace el sumatorio de todos estos productos de cada variable dentro de un ODS. A continuación, se suman todos los sumatorios de los productos obtenidos en cada ODS obteniendo el resultado de la matriz. Para comprobar que los cálculos se han realizado correctamente, se recalcula la matriz realizando

CONAMA 2024

MATRIZ INTELIGENTE PARA DECIDIR SISTEMAS DE RECOGIDA NEUMÁTICA DE RESIDUOS

igualmente el producto de la magnitud por el impacto, pero esta vez se calcula el sumatorio de todos estos productos dentro de una misma variable para todos los ODS, haciendo finalmente la suma de todos estos sumatorios calculados se obtiene el mismo resultado de cálculo para la matriz [Figura 3].

El resultado de la matriz de decisión final dependerá del valor asignado a la magnitud por cada técnico competente en su localidad. No obstante, la matriz de referencia utilizada en dicha investigación para determinar el umbral de la conveniencia o no de implantación de un SRNRSU, teniendo en cuenta el valor neutro de 3 ó -3 para la magnitud, da como resultado el valor 537. En consecuencia, una vez realizado el estudio por los técnicos cualificados y calculada la matriz correspondiente al caso particular en estudio, un resultado por encima de este umbral sería favorable a la implantación del sistema mientras que un valor inferior indicaría lo contrario.

SELECTION MATRIX																
	Variable 1 (negative)	Variable 2 (Negative)	Variable 3 (Positive)	Variable 4 (Positive)	Variable n (Positive)	SumProduct	TOTAL								
SDG 1	-3	-3						-18								
SDG 2			3	3				9								
SDG 3			3	3	3	3	3	36								
SDG 4	-3							-9								
.....		-3	3					0								
SDG 17			3	3	3			27								
SumProduct	-18	-18	36	18	18	9										
TOTAL	45															

Figura 3. Sumatorio de productos de la Magnitud por el Impacto

Aunque el valor de la matriz de referencia podría variar ante la inclusión de nuevas variables u ODS, los algoritmos de cálculo permanecen constantes, asegurando consistencia en la toma de decisiones. Los resultados obtenidos a través de esta metodología varían entre 103 y 959, indicando una escala desde una total inconveniencia de implantación hasta la mayor conveniencia, respectivamente.

Superados los límites del valor de la matriz de referencia de $\pm 10\%$ tanto por arriba como por abajo [Figura 4], se puede considerar con certeza la conveniencia o inconveniencia de implantación del sistema; por encima del $+10\%$ queda perfectamente demostrada la conveniencia mientras que por debajo del -10% se consideraría totalmente inconveniente su implantación.

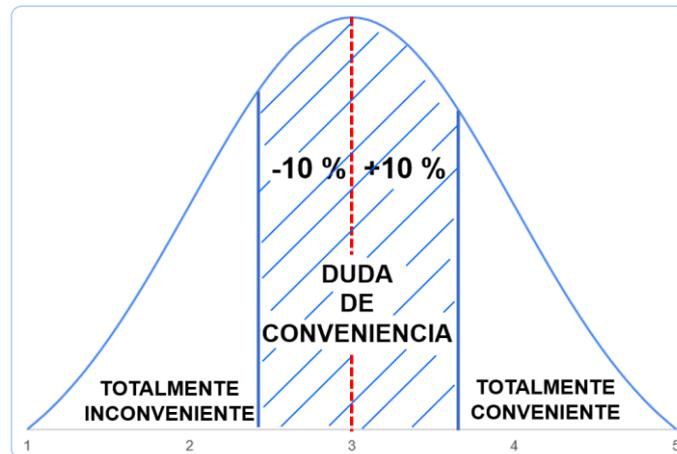


Figura 4. Rango de conveniencia para la implantación de un SRNRSU

Establecido el rango de incertidumbre en la toma de decisión, se procede a un segundo análisis para asegurar un resultado más confiable. Para ello se recurre al valor que aporta a la matriz de referencia las ODS de mayor impacto según encuesta de El Ágora Diario (Cáceres, 2020).

En el cálculo de la matriz neutra de referencia con valor 537, las ODS de mayor impacto (Molina-Jorge, Terrón-López, & Latorre-Dardé, 2024) suponen poco más de la mitad de la valoración total (51,96%), por lo que en aquellas matrices con los datos rellenos por parte de las autoridades, se calculará el porcentaje que supone la valoración en las ODS clasificadas con Importancia Alta, este valor deberá superar el 52% del valor de la matriz al igual que la matriz de referencia para poder proponer la conveniencia de implantación, en caso de no superar este porcentaje del 52%, se entiende que la conveniencia de implantación del sistema no es aconsejable.

En el cuadro 3 se muestra una tabla a modo de resumen de los resultados obtenidos y donde se refleja la ODS que mayor importancia es otorgada a ojos de los encuestados, si bien, no todas las ODS son susceptibles de análisis dentro de nuestro estudio ya que no aplican con ciertas variables de la matriz de decisión, se muestran el número obtenidos de votos para poder ordenarlas según los percentiles 33% y 66%.

Cuadro 3. En color rojo las ODS cuyo percentil de votos se encuentra por encima del 66% (Importancia Alta). ODS de mayor impacto. Fuente: El Ágora diario del agua (Cáceres, 2020)

ODS	Nº ODS	Nº Votos	% Votos
Fin de la Pobreza	1	273	16 %
Hambre Cero	2	218	13 %
Salud Bienestar	3	224	14 %
Educación de Calidad	4	190	11 %
Igualdad de Género	5	74	4 %
Agua Limpia y Saneamiento	6	154	9 %
Energía Asequible y No Contaminante	7	33	2 %
Trabajo Decente y Crecimiento Económico	8	63	4 %
Industria, Innovación e Infraestructura	9	10	1 %

CONAMA 2024

MATRIZ INTELIGENTE PARA DECIDIR SISTEMAS DE RECOGIDA NEUMÁTICA DE RESIDUOS

Reducción de las Desigualdades	10	44	3 %
Ciudades y Comunidades Sostenibles	11	44	3 %
Producción y Consumos Responsables	12	44	3 %
Acción por el Clima	13	116	7 %
Vida Submarina	14	14	1 %
Vida de Ecosistemas Terrestres	15	49	3 %
Paz, Justicia e Instituciones Sólidas	16	54	3 %
Alianzas para lograr los Objetivos	17	54	3 %

Los ODS con mayor impacto son el Fin de la Pobreza (ODS 1), Hambre Cero (ODS 2), Salud y Bienestar (ODS 3), Educación de Calidad (ODS 4), Agua Limpia y Saneamiento (ODS 6) y Acción por el Clima (ODS 13), por lo que se consideran ODS con Importancia Alta, si bien, no todas las ODS de gran impacto interactúan con las variables del estudio, ya que por mucha importancia que sea asignada por los encuestados, no aplican a los sistemas de implantación de recogida neumática ni directa ni indirectamente, para el caso que aplica en nuestra toma de decisión, sólo se tendrán en cuenta las ODS 3, 6 y 13.

En el cuadro 4 se muestran los ODS de mayor impacto que interactúan con las variables del estudio y cuyos valores otorgados en el cálculo de la matriz de decisión son los que se tienen en cuenta para este segundo análisis de confiabilidad en la implantación o no de los sistemas de recogida neumática.

Cuadro 4. ODS con Importancia Alta relacionadas con las variables del estudio (Fuente: Elaboración propia)

ODS	
	ODS 3: Salud y Bienestar
	ODS 6: Agua Limpia y Saneamiento
	ODS 13: Acción por el Clima

Atendiendo a los valores de la matriz neutra de referencia:

- Valor neutro de la matriz de referencia: 537.
- 52% del valor neutro de la matriz de referencia: 279,24.

CONAMA 2024

MATRIZ INTELIGENTE PARA DECIDIR SISTEMAS DE RECOGIDA NEUMÁTICA DE RESIDUOS

En el cuadro 5 se muestran las posibles opciones de conveniencia dentro del rango de duda, esto es cuando los resultados del estudio de valoración se encuentran entre el $\pm 10\%$ del umbral generado por el valor neutro establecido en 3.

Cuadro 5. Conveniencia de implantación de un SRNRSU dentro del umbral de duda en la matriz de decisión (Fuente: Elaboración propia)

RANGO DUDA 3 \pm 10%	% ODS DE MAYOR IMPACTO (ODS 3, 6 Y 13)	CONVENIENCIA DE IMPLANTACIÓN
Rango 3 + 10%	$\geq 52\%$	Conveniente
Rango 3 + 10%	$< 52\%$	No Conveniente
Rango 3 - 10%	$\geq 52\%$	Conveniente
Rango 3 - 10%	$< 52\%$	No Conveniente

Una vez establecidas todas las condiciones de contorno y realizados los cálculos en base al conocimiento existente por parte de los técnicos competentes en cada municipio donde se quiera evaluar la conveniencia de implantación de los sistemas de recogida neumática, en el cuadro 6 se presentan todas las posibilidades que se pueden dar tras el cálculo de la matriz de decisión.

Cuadro 6. Conveniencia de implantación de un SRNRSU según la matriz de decisión (Fuente: Elaboración propia)

RANGO VALORACIÓN ANÁLISIS	% ODS DE MAYOR IMPACTO (ODS 3, 6 Y 13)	CONVENIENCIA DE IMPLANTACIÓN
Rango $> 3 + 10\%$		Conveniente
Rango 3 + 10%	$\geq 52\%$	Conveniente
Rango 3 + 10%	$< 52\%$	No Conveniente
Rango $< 3 - 10\%$		No Conveniente
Rango 3 - 10%	$\geq 52\%$	Conveniente
Rango 3 - 10%	$< 52\%$	No Conveniente

Este enfoque proporciona una herramienta sólida y adaptable para la toma de decisiones respecto a la implantación de sistemas de recogida neumática, alineándose de manera efectiva con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y respondiendo a las particularidades de cada localidad en línea con lo que dicen otros autores (Punkkinen, Merta, Teerioja, Moliis, & Kuvaja, 2012; Alvarado López, 2017; Garcia-Herrero, et al., 2018; Iriarte, Gabarrell Durany, & Rieradevall, 2009; Teerioja, et al., 2012; Torkayesh, Malmir, & Asadabadi, 2021; Voukkali, Papamichael, Loizia, & Zorpas, 2024).

4. CONCLUSIONES

Los sistemas de recogida neumática de residuos sólidos urbanos a pesar de los elevados costes que requiere su inversión y las molestias durante el proceso de ejecución, prometen ser un

instrumento muy eficaz para tener ciudades más inteligentes y acercarlas a los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Su implantación con la ayuda de las nuevas tecnologías facilita la gestión de los residuos y mejora la calidad de vida de los ciudadanos, haciéndolos partícipe en su éxito. Estos sistemas contribuyen a la creación de ciudades inteligentes más sostenibles, ecoeficientes y conectadas, alineándose con las directrices ambientales establecidas por naciones unidas.

La matriz de decisión no es una herramienta fija e inamovible ya que puede evolucionar y adaptarse a posibles nuevas variables del contexto sociocultural. Debido a que la percepción de los sistemas de recogida neumática puede estar influenciada por factores locales, podría ser necesario ajustar los varemos de medición de la matriz de decisión y/o agregar nuevas variables con características significativamente diferentes de los municipios estudiados.

La matriz inteligente de decisión ha sido diseñada como una herramienta útil y precisa para evaluar la conveniencia de implantación de SRNRSU. Esta tecnología de recogida de residuos al combinarse con IA y el análisis multicriterio (Chàfer, Sole-Mauri, Solé, Boer, & Cabeza, 2019), se puede adaptar mejor a los diferentes contextos urbanos tanto de en nuevos desarrollos como en áreas consolidadas. La rigurosidad con la que se ha diseñado la matriz refuerza su fiabilidad como solución resiliente y sostenible, dejando abierta la posibilidad a futuros estudios que integren nuevas variables y tecnologías emergentes para optimizar su implantación.

La matriz de decisión no es exclusiva para SRNRSU, por su configuración puede adaptarse a nuevos sistemas de recogida tanto existentes como los que estén por llegar, siempre y cuando se tenga muy clara la relación entre las variables a estudiar y los objetivos de desarrollo sostenible sobre los cuales se quiera evaluar.

Los pasos futuros deben centrarse en estudios a largo plazo de ahorro de energía, reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y durabilidad de los materiales, proporcionando conocimientos más profundos sobre la efectividad de tales sistemas en las ciudades sostenibles.

BIBLIOGRAFIA

Alvarado López, R. A. (2017, September 1). Ciudad inteligente y sostenible: una estrategia de innovación inclusiva. *PAAKAT: Revista de Tecnología y Sociedad*, 13(7), 1-17. doi:10.32870/Pk.a7n13.299

Asefi, H., & Lim, S. (2017). A novel multi-dimensional modeling approach to integrated municipal solid waste management. *Journal of Cleaner Production*, 166, 1131-1143. doi:10.1016/j.jclepro.2017.08.061

Cáceres, P. (2020). Los ODS del agua y el hambre son los más importantes para los ciudadanos. *El Ágora, diario del Agua*. Retrieved August 22, 2023

Chàfer, M., Sole-Mauri, F., Solé, A., Boer, D., & Cabeza, L. F. (2019). Life cycle assessment (LCA) of a pneumatic municipal waste collection system compared to traditional truck collection. Sensitivity study of the influence of the energy source. *Journal of Cleaner Production*, 231(10), 1122-1135. doi:10.1016/j.jclepro.2019.05.304

- Costi, P., Minciardi, R., Robba, M., Rovatti, M., & Sacile, R. (2004). An environmentally sustainable decision model for urban solid waste management. *Waste Management*, 24(3), 277-295. doi:10.1016/S0956-053X(03)00126-0
- Diario Oficial de la Unión Europea. (2018, May 30). *Directiva (UE) 2018/ del Parlamento Europeo y del Consejo, de 30 de mayo de 2018 por la que se modifica la Directiva 2008/98/CE sobre los residuos*. Retrieved June 2, 2024, from <https://www.boe.es/doue/2018/150/L00109-00140.pdf>
- Dotsenko, A. I., & Babaev, T. K. (2023). Pneumatic transportation of municipal waste – a means of improving the ecology of the city. *XII International Scientific and Practical Forum “Environmentally Sustainable Cities and Settlements: Problems and Solutions” (ESCP-2023)*, 403, p. 8. Moscow (Russia) and Hanoi (Vietnam). doi:10.1051/e3sconf/202340304004
- ENVAC Group. (2024). *Descubre el Sistema Envac de Recogida Neumática de Residuos*. Retrieved August 3, 2024, from ENVAC: <https://www.envacgroup.com/es/como-funciona-el-sistema-recogida-neumatica-de-residuos/>
- Eurostat. (2024, February 8). *Municipal waste down by 19 kg per person in 2022*. Retrieved May 25, 2024, from <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20240208-2#:~:text=In%202022%2C%20the%20amount%20of,considerably%20among%20the%20EU%20members>
- Farré, J. A., Llantoy, N., Chàfer, M., Gómez, G., & Cabeza, L. F. (2022, January). Life Cycle Assessment (LCA) of Two Pneumatic Urban Waste Collection Systems Compared to Traditional Truck Collection in an Airport. *Sustainability*, 14(3), 1109. doi:10.3390/su14031109
- Farré, J. A., Mateu, C., Teixidó, M., & Cabeza, L. F. (2023). Pneumatic Urban Waste Collection Systems: A Review. *Applied Sciences*, 13(2), 877. doi:10.3390/app13020877
- Garcia-Herrero, I., Oliveira-Leao, S., Margallo, M., Laso, J., Bala, A., Fullana, P., . . . Aldaco, R. (2018). Life Cycle Energy Assessment of Pneumatic Waste Collection Static Systems: A Case Study of Energy Balance for Decision-Making Process. *Chemical Engineering Transactions*, 70, 1699-1704. doi:10.3303/CET1870284
- INE. (26 de febrero de 2023). *Instituto Nacional de estadística. Demografía y población. Cifras de población y Censos demográficos*. Recuperado el 2023, de Proyección de Hogares. Últimos Datos: https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=1254736176954&menu=ultiDatos&idp=1254735572981
- Iriarte, A., Gabarrell Durany, X., & Rieradevall, J. (2009). LCA of selective waste collection systems in dense urban areas. *Waste Management*, 29(2), 903-914. doi:10.1016/j.wasman.2008.06.002

- Kaza, S., Yao, L. C., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Retrieved June 23, 2024, from Urban Development. World Bank: <https://hdl.handle.net/10986/30317>
- Khan, S., & Faisal, M. N. (2008). An analytic network process model for municipal solid waste disposal options. *Waste Management*, 28(9), 1500-1508. doi:10.1016/j.wasman.2007.06.015
- Kharat, M. G., Murthy, S., Kamble, S. J., Raut, R., Kamble, S. S., & Kharat, M. G. (2019). Fuzzy multi-criteria decision analysis for environmentally conscious solid waste treatment and disposal technology selection. *Technology in Society*, 57, 20-29. doi:10.1016/j.techsoc.2018.12.005
- Laso, J., García-Herrero, I., Margallo, M., Bala, A., Fullana-i-Palmer, P., Irabien, A., & Aldaco, R. (2019). LCA-Based Comparison of Two Organic Fraction Municipal Solid Waste Collection Systems in Historical Centres in Spain. *Energies*, 12(7), 1407. doi:10.3390/en12071407
- Leopold, L. B., Clarke, F. E., Hanshaw, B. B., & Balsley, J. R. (1971). *A procedure for evaluating environmental impact*. Washington, D.C.: U.S. Geological Survey. doi:10.3133/cir645
- Lietz, P. (2010). Research into Questionnaire Design: A Summary of the Literature. *International Journal of Market Research*, 52(2). doi:10.2501/S147078530920120
- Malhotra, N. K. (2011). Questionnaire Design and Scale Development. In R. Grover, & M. Vriens, *The Handbook of Marketing Research*. SAGE Publications, Inc. doi:10.4135/9781412973380
- Martínez Bencardino, C. (2012). Distribuciones Muestrales. Muestreo aleatorio. In *Estadística y Muestreo* (pp. 303-308). Bogotá, Colombia: ECOE Ediciones. Retrieved from <https://www.ecoediciones.com/wp-content/uploads/2019/05/Estadistica-y-muestreo-14ed.pdf>
- Miller, B., Spertus, J., & Kamga, C. (2014). Costs and benefits of pneumatic collection in three specific New York City cases. *Waste Management*, 34(11), 1957-1966. doi:10.1016/j.wasman.2014.06.008
- Molina-Jorge, Ó., Terrón-López, M.-J., & Latorre-Dardé, R. (2024). A Quantitative Assessment Approach to Implement Pneumatic Waste Collection System Using a New Expert Decision Matrix Related to UN SDGs. *Applied Sciences*, 14(18), 830. doi:<https://doi.org/10.3390/app14188306>
- Mordor Intelligence. (2023, October 3). *Revolutionizing Urban Living: The Pneumatic Waste Management System Market*. Retrieved August 1, 2024, from <https://www.mordorintelligence.com/blog/revolutionizing-urban-living-the-pneumatic-waste-management-system-market>

- Ortuño Padilla, A. (2013). El modelo "Transit Oriented Development (T.O.D.)" Posibilidades de implementación en el Corredor Alicante-Benidorm. *riURB. Revista Iberoamericana de Urbanismo*(10), 23-33. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10045/35761>
- Ortuño Padilla, A., Fernández Morote, G., & Fernández Aracil, P. (2017). TOD model (Transit-Oriented-Development): Estudio de casos internacionales y proceso de implementación. *Bulletin of the Association of Spanish Geographers*(73), 99-121. doi:10.21138/bage.2411
- Peñuelas Menéndez, J. M., Ortiz Ots, J. M., Gómez Barbero, M., & Berbel Vecino, J. (2001). Análisis comparado de modelos de recogida selectiva de envases orgánicos. *Residuos: Revista técnica*(59), 52-57.
- Pires, A., Martinho, G., & Chang, N.-B. (2011). Solid waste management in European countries: A review of systems analysis techniques. *Journal of Environmental Management*, 92(4), 1033-1050. doi:10.1016/j.jenvman.2010.11.024
- Punkkinen, H., Merta, E., Teerioja, N., Moliis, K., & Kuvaja, E. (2012). Environmental sustainability comparison of a hypothetical pneumatic waste collection system and a door-to-door system. *Waste Management*, 32(12), 1775-1781. doi:10.1016/j.wasman.2012.05.003
- Redacción EFEverde. (2017, April 24). *Residuos Gestión*. Retrieved August 2022, 14, from La gestión de residuos en España cuesta 40 euros al año por persona: <https://efeverde.com/gestion-residuos-espana-cuesta-40-euros-ano-persona/>
- Teerioja, N., Moliis, K., Kuvaja, E., Ollikainen, M., Punkkinen, H., & Merta, E. (2012). Pneumatic vs. door-to-door waste collection systems in existing urban areas: a comparison of economic performance. *Waste Management*, 32(10), 1782-1791. doi:10.1016/j.wasman.2012.05.027
- Torkayesh, A. E., Malmir, B., & Asadabadi, M. R. (2021). Sustainable waste disposal technology selection: The stratified best-worst multi-criteria decision-making method. *Waste Management*, 122, 100-112. doi:10.1016/j.wasman.2020.12.040
- United Nations. (2023). *Take Action for the Sustainable Development Goals*. Retrieved May 12, 2024, from <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>
- Voukkali, I., Papamichael, I., Loizia, P., & Zorpas, A. A. (2024). Urbanization and solid waste production: prospects and challenges. *Sustainable Waste Management & Circular Economy*, 31, 17678–17689. doi:10.1007/s11356-023-27670-2