

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/322356860>

# Modelo para el cálculo de indicadores del impacto ambiental de la recogida selectiva de residuos orgánicos en Madrid

Article · January 2018

CITATIONS

0

READS

5

3 authors, including:



[Jose-Luis Galvez-Martos](#)

Madrid Institute for Advanced Studies

53 PUBLICATIONS 405 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



[Javier Dufour](#)

King Juan Carlos University / IMDEA Energy Inst...

138 PUBLICATIONS 1,209 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Stainless steel pickling liquor recovery [View project](#)



Sustainability assessment of energy systems [View project](#)

# Modelo para el cálculo de indicadores del impacto ambiental de la recogida selectiva de residuos orgánicos en Madrid

José Luis Gálvez Martos<sup>1</sup>, Iván Sánchez<sup>1</sup>, Javier Dufour<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Instituto IMDEA Energía | [www.energia.imdea.org](http://www.energia.imdea.org) ■ <sup>2</sup>Universidad Rey Juan Carlos | [www.urjc.es](http://www.urjc.es)

El Ayuntamiento de Madrid ha comenzado la implantación de un sistema de recogida selectiva y sistemática de la fracción orgánica de los residuos urbanos. El nuevo contrato de contenerización, recogida y transporte de residuos está incluido dentro del “Plan de Gestión de Residuos para el periodo 2017-2022” desa-

rollado por el Área de Gobierno de Medio Ambiente y Movilidad el cual presenta dos objetivos a cumplir antes del año 2020: la reducción de la generación de residuos en un 20% y aumentar los residuos generados destinados a etapas de reutilización hasta el 50%. Por este motivo, el conocido como quinto contenedor se ha presentado como una

alternativa imprescindible para la consecución de dichos objetivos.

La unidad de Análisis de Sistemas de IMDEA Energía, especializada en análisis ambiental y económico y al cual los autores pertenecen, no ha podido encontrar ninguna métrica, indicador o información que pronostique de forma cuantitativa el impacto ambien-



tal previsto del nuevo sistema de gestión. Sin embargo, la cuantificación de dicho impacto debe dar respuesta a algunas de las preguntas más frecuentes sobre su implantación: ¿cuál es el beneficio ambiental obtenido como consecuencia de la modificación de la gestión de los biorresiduos generados en Madrid? ¿Es realmente ésta una alternativa de gestión con un mejor perfil ambiental?

En este contexto, el modelo ECR<sup>3</sup> fue desarrollado en IMDEA Energía con el objetivo de dar respuesta a estas preguntas y no sólo para el caso de Madrid. ECR<sup>3</sup> calcula indicadores ambientales asociados a sistemas de gestión de residuos, desde el modelado fundamental de cada una de las etapas de gestión hasta la integración de las tecnologías disponibles en un territorio y sus costes de transporte. Actualmente, el modelo se encuentra en fase de desarrollo y el análisis de la situación en Madrid, a través de un submodelo llamado ECR<sup>3</sup>-Madrid, es su primer test.

## INTRODUCCIÓN

Pese a los esfuerzos de los pasados años, la disposición final de los residuos sólidos urbanos (RSU) en vertedero es la práctica más extendida en la ciudad de Madrid y en su Comunidad. Es bien sabido que el vertedero controlado es la alternativa que genera un mayor daño ambiental como consecuencia de la generación de lixiviados, emisión de gases contaminantes y la extensa ocupación del terreno.

La Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo sobre los residuos promueve el uso de técnicas adecuadas de gestión, recuperación y reciclado de residuos con el fin de proteger el medio ambiente y la salud humana. Sin embargo y pese a multitud de planes de gestión, la cantidad de RSU en la Comunidad de Ma-

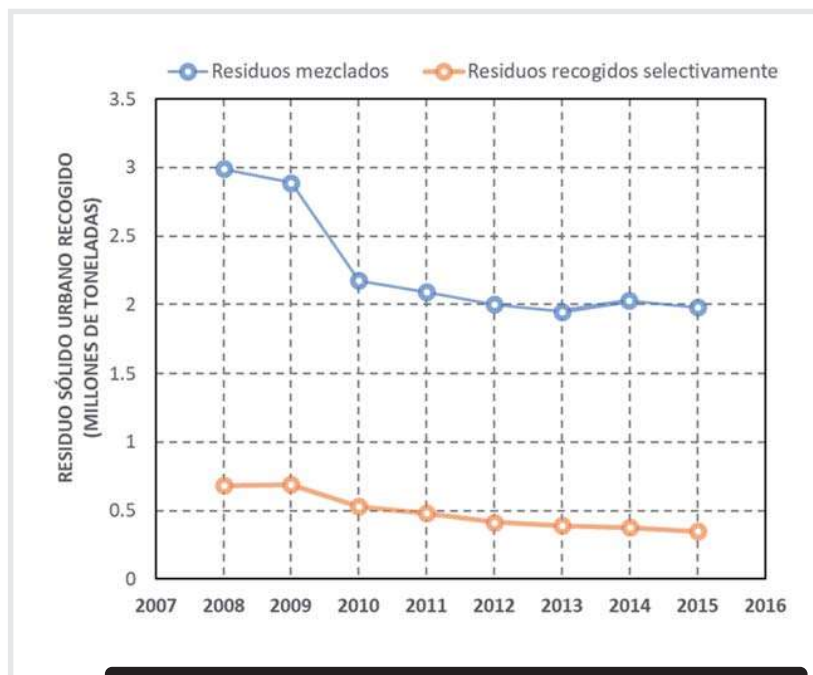


Figura 1. Evolución de la cantidad de residuos sólidos urbanos gestionados en la Comunidad de Madrid

adrid en los últimos años ha estado directamente acoplada a la actividad económica. La reducción observada desde 2010 es en la cantidad de residuos está, en realidad, debida a un descenso de la actividad económica y no a planes de prevención especial-

mente eficaces en la región. La prueba de esto se observa en que la reducción de residuos generados no se acompañó de un aumento de la fracción de residuos recogida de manera selectiva, sino de un descenso proporcional de dicha fracción (Figura 1).



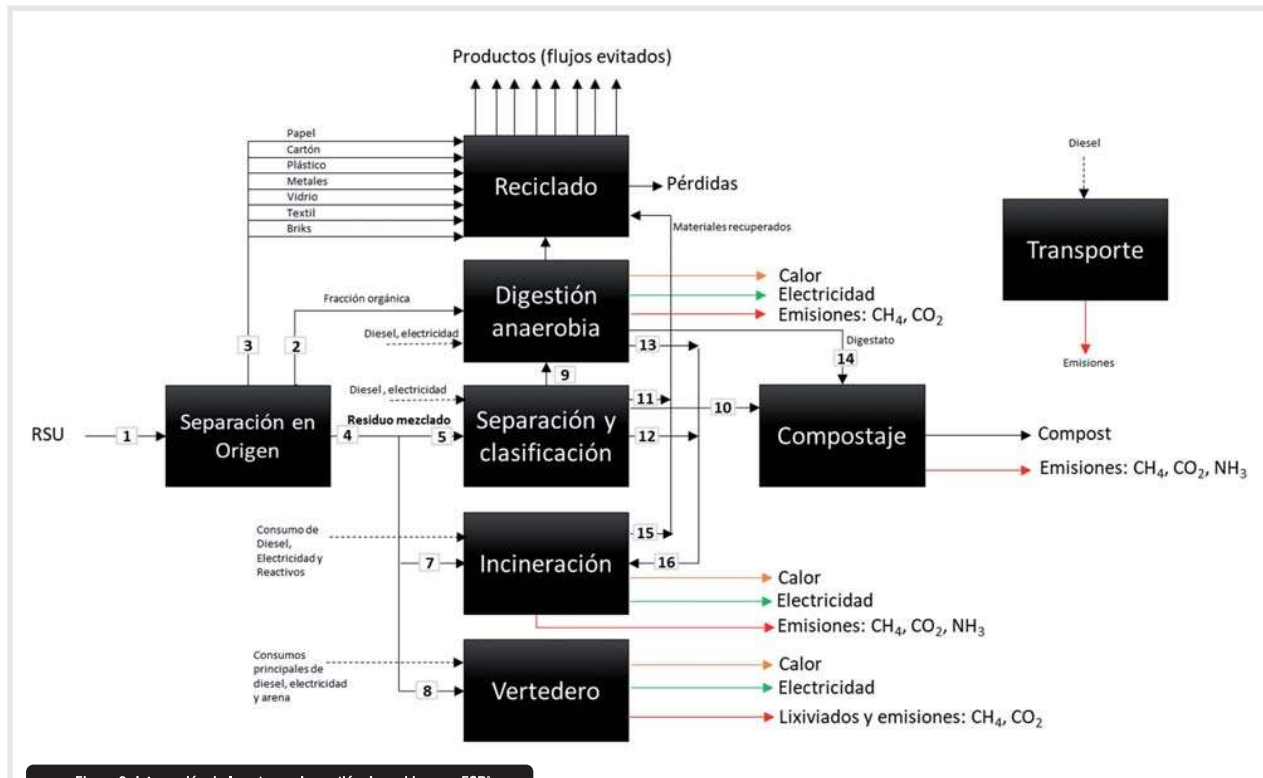


Figura 2. Integración de las etapas de gestión de residuos en ECR<sup>3</sup>

Desde un punto de vista puramente ambiental, en la ciudad de Madrid es prioritaria la modificación del modelo de gestión de residuos para alcanzar los criterios de reciclaje propuestos por la UE. Una de las posibles vías de actuación es la implantación del servicio de recogida selectiva de la fracción orgánica de RSU. Con esta medida, sería posible un proceso de digestión anaerobia de la fracción orgánica para la producción de biogás, además de digestato que pueda generar compost de calidad, gracias a la menor cantidad de impurezas en la fracción orgánica inicial. Dicho tratamiento se integra actualmente como parte fundamental del Parque Tecnológico de Valdemingómez, donde la fracción orgánica recogida selectivamente sería alimento de los procesos de biometanización.

### EL MODELO ECR<sup>3</sup>-MADRID

Se hace necesario, pues, un pronós-

tico del impacto de la nueva actividad en un sistema de gestión de RSU como el de la ciudad de Madrid que permita no sólo evaluar su huella y su coste, sino compararlo con otras alternativas de gestión y calcular su beneficio. Por ello, IMDEA Energía ha creado el concepto “Economía Circular: Refinería de Residuos a Recursos, ECR<sup>3</sup>” como estrategia de análisis holístico de sistemas de gestión de residuos y cuya máxima expresión es una aplicación informática, todavía en fase de desarrollo de código, para el cálculo de flujos materiales, energéticos, indicadores ambientales de ciclo de vida y costes de sistemas de gestión de RSU.

El modelo ECR<sup>3</sup> se plantea como una herramienta de cálculo de flujos de residuos basada en el desarrollo de escenarios de gestión realizado por Dr Davide Tonini (Tonini et al., 2013) para Copenhague. Como gran elemento diferenciador, ECR<sup>3</sup> además permite el

análisis de los flujos energéticos para el cálculo de inventarios ambientales e indicadores ambientales. Uno de los más importantes y que acapara más atención es el cálculo de la huella de carbono, medida en kilogramos de CO<sub>2</sub> equivalente por tonelada de residuo gestionado por el sistema; el término “equivalente” se refiere a la equivalencia de impacto en términos de CO<sub>2</sub> que gases como el CH<sub>4</sub> o el N<sub>2</sub>O tienen en términos de calentamiento global. Así, 1 kg CH<sub>4</sub> equivale a 28.5 kg de CO<sub>2</sub> y 1 kg de N<sub>2</sub>O equivale a 264.8 kg de CO<sub>2</sub> según el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (Myhre et al., 2013). Estas equivalencias son de especial relevancia en la gestión de la huella de vertederos y tratamientos biológicos.

Durante 2017, IMDEA Energía creó el modelo ECR<sup>3</sup>-Madrid, una versión específica del modelo ECR<sup>3</sup> para la ciudad de Madrid a partir de los datos de recogida y rendimientos que se en-

cuentran en la “Memoria de Actividades de la Dirección General del Parque Tecnológico de Valdemingomez 2016”. Mediante los flujos de entrada y salida a cada uno de los tratamientos se ha calculado el porcentaje de residuos dirigido a cada tratamiento final. ECR<sup>3</sup> considera separación en origen como la primera fase del proceso de tratamiento para hacerlo compatible con la mayoría de sistemas de gestión en Europa y en el mundo, y para poder calcular el impacto que el transporte de residuos tiene en el sistema de gestión. Sin embargo, Madrid, como gran parte de España, recoge una gran parte de los reciclables como residuo reciclable mezclado (co-mingled) que después es tratado en plantas de

separación y clasificación, cuya fracción rechazo es conducida a vertedero, incineradora o a otros tratamientos.

Para mantener la estructura de cálculo de flujos que imita al sistema de Tonini, se ha priorizado que el modelo ECR<sup>3</sup>-Madrid sea capaz de predecir el destino final de cada fracción de materiales presente en el residuo inicial; es decir, que las entradas y salidas a cada operación de tratamiento sean iguales, incluidas aquellas de distribución y transporte. Esto es especialmente delicado dados los grandes volúmenes de rechazo en las plantas de clasificación y separación del parque Tecnológico de Valdemingómez. ECR<sup>3</sup>-Madrid también asume una composición de residuo sólido urbano y su humedad para

calcular la distribución corrientes de entrada a cada tratamiento final, según aparece en la Figura 2. La distribución calculada de los flujos de corrientes materiales por ECR<sup>3</sup>-Madrid se muestra en la Figura 3; según se observa, la distribución estimada por ECR<sup>3</sup>-Madrid muestra desviaciones inferiores al 0.5% de los datos reales publicados por el ayuntamiento de Madrid para el Parque Tecnológico de Valdemingómez. Se considera, pues, que ECR<sup>3</sup>-Madrid es apto para la predicción del impacto ambiental del sistema de gestión de residuos.

### SUPOSICIONES PRINCIPALES

Con el actual modelo de gestión de

**TETma**  
TÉCNICAS Y TRATAMIENTOS MEDIOAMBIENTALES

*Cuidando del medioambiente desde 1995*

**Gestión integral del ciclo de los residuos:**

- Recogida
- Tratamiento
- Valorización

[www.tetma.com](http://www.tetma.com)

Una empresa de :

**BECSA**  
SERVICIOS INTEGRALES

  
LIFE WASTE 2 BIOFUEL

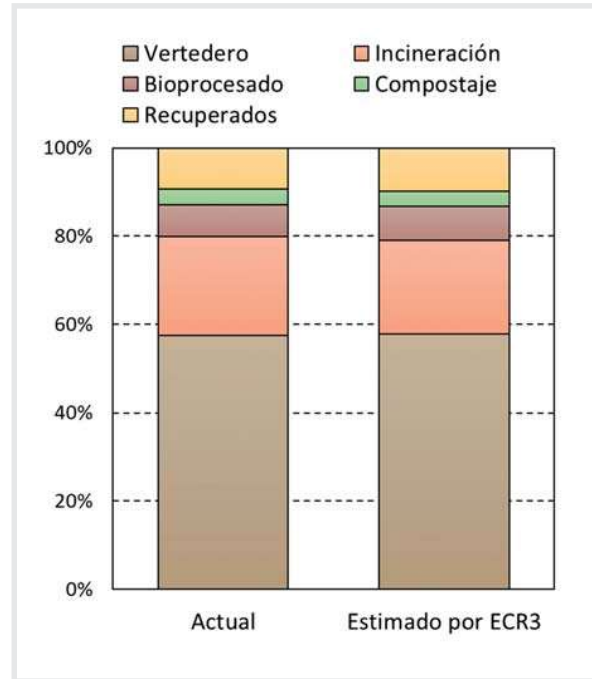


Figura 3. Distribución de flujos de residuos por tratamiento final. Valores actuales y distribución estimada por el modelo ECR<sup>3</sup>-Madrid

residuos llevado a cabo en Madrid, la fracción orgánica que proviene de la planta de clasificación y separación, en el Parque Tecnológico de Valde-mingomez, se dirige a un trómel donde se separa la fracción menos densa dirigiéndose a los tratamientos biológicos de biometanización o compostaje. La presencia de materia orgánica en la entrada a las biometanizadoras, que en este documento también llamaremos digestores, es alta, pero la composición de esta entrada dista de ser óptima tanto para la producción de biogás como para la producción de compost de calidad aceptable. Mediante la implantación de la recogida selectiva de la fracción orgánica se persigue la purificación de la corriente de entrada a los tratamientos biológicos disminuyendo la cantidad de residuos que no intervienen en la reacción y que disminuyen su rendimiento, así como eliminar contaminantes del digestato final. La digestión anaerobia de la fracción orgánica evita la gene-

ración de grandes volúmenes de metano en los vertederos, a los que actualmente se dirige en torno al 60% de los residuos sólidos urbanos generados en Madrid.

En este trabajo presentamos una pequeña parte de los resultados de análisis ambiental obtenidos con ECR<sup>3</sup>-Madrid cuando se alcanzan diferentes valores de captura en origen de la fracción orgánica: 30% y 70%. Si bien el modelo tiende a ser riguroso en muchos aspectos, existe una gran cantidad de suposiciones iniciales que afectan a cualquier resultado. En la siguiente lista se detallan algunas de las más relevantes:

- Composición de partida. Si bien el ayuntamiento de Madrid expone en su página web información sobre la composición de residuos sólidos urbanos, esta información es genérica y omite información relevante. En realidad, ECR<sup>3</sup> está preparado para el cálculo de los flujos de 14 fracciones materia-

les: orgánico (origen biológico), papel reciclable, papel no reciclable, cartón reciclable, cartón no reciclable, briks, plástico reciclable y no reciclable, vidrio reciclable y no reciclable, textil, metales ferrosos, metales no ferrosos y otros. Cada fracción se caracteriza por un contenido en humedad, contenido en carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre, y poder calorífico inferior. Por tanto, es necesario que la composición publicada por el ayuntamiento de Madrid se combine con datos bibliográficos (por ejemplo, Götze et al., 2016) para obtener un estimador de propiedades del residuo.

- Rendimiento de los tratamientos. Cada etapa de tratamiento está parametrizada según el modelo de Tonini (Tonini et al., 2013) que calcula los rendimientos energéticos de las operaciones, sus consumos de materiales y combustible según valores medios Europeos por tonelada de residuo a la entrada. Este modelo de caja negra es convencional en el establecimiento de



inventarios ambientales de procesos de tratamiento de residuos.

- Escenarios y flujos. Una de las principales cuestiones a resolver es el impacto que nuevos procesos de tratamiento tienen en la composición de residuos y en los flujos a cada tratamiento final. No sería conveniente, por ejemplo, suponer que el flujo desviado

de materia orgánica tiene un impacto proporcional y equivalente en los flujos a vertedero, incineración u otros procesos biológicos. En este caso, ECR<sup>3</sup>-Madrid supone que, una vez introducida la digestión anaerobia de la fracción orgánica separada, el balance se resuelve de la siguiente manera: (i) se reduce la cantidad de materia orgánica

en la composición del residuo de entrada al sistema de gestión de residuo mezclado, (ii) el flujo principal desviado procede de la fracción a vertedero, es decir, en términos generales la separación selectiva reduce el flujo a vertedero; (ii) la capacidad de incineración se mantiene constante, (iii) se aumenta la cantidad de residuos totales que se alimentan a procesos biológicos para cuadrar el balance.

- Huella de carbono y CO<sub>2</sub> biogénico. En este artículo sólo se presenta el cálculo de la huella de carbono sin la substracción del CO<sub>2</sub> de origen biogénico. La huella de carbono y los impactos asociados a los consumos de electricidad, calor, diésel y otras materias primas necesarias se toma de la base de datos Ecoinvent 2.2. Los flujos evitados se definen como el impacto de aquellos subproductos del sistema de gestión de residuos que evitan la extracción de materias primas y fabricación de materiales u obtención de energía. Así, los flujos evitados tienen huella de carbono negativa y sus com-

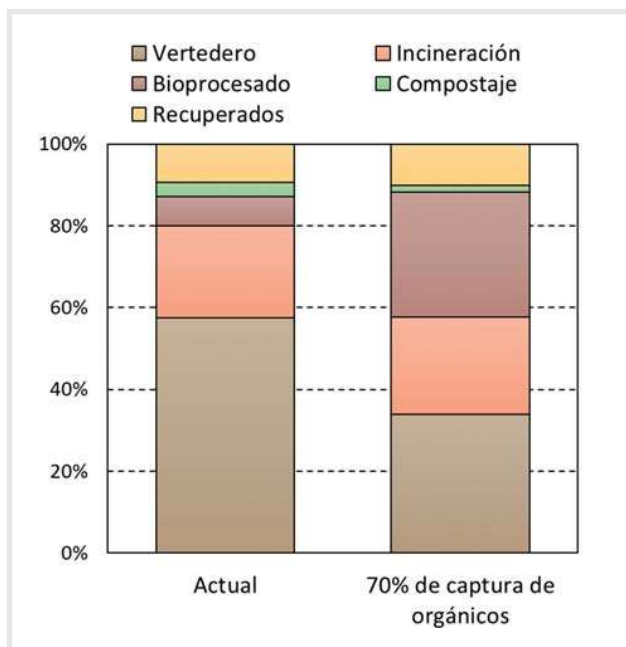


Figura 4. Distribución de flujos de residuos por tratamiento final. Valores actuales y distribución estimada por el modelo ECR-Madrid

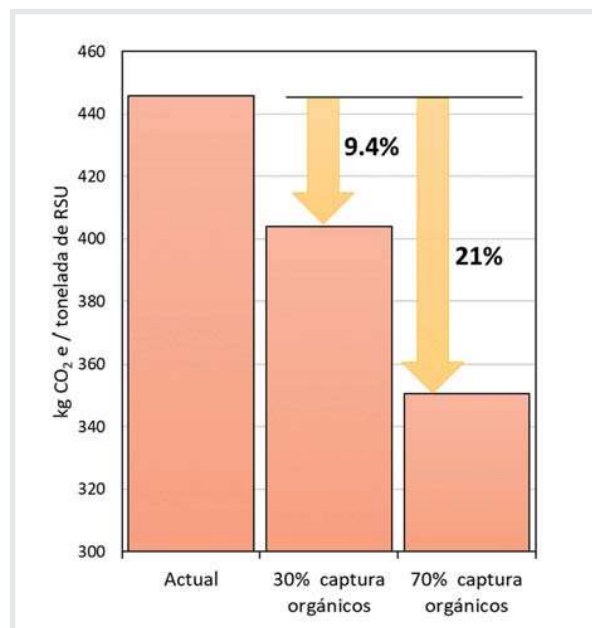


Figura 5. Huella de carbono del sistema de gestión de residuos para el escenario actual y escenarios proyectados con un 30% y un 70% de captura de residuo orgánico recogido selectivamente. El CO<sub>2</sub> biogénico no ha sido substracción en este análisis



ponentes principales serán la electricidad (e.g. procedente de la incineración), gas renovable (metano procedente de la digestión anaerobia de residuos orgánicos), y materiales reciclados, como papel, plástico, vidrio, metales y áridos. Otros impactos ambientales son calculados de manera similar por ECR<sup>3</sup>-Madrid.

## RESULTADOS

La Figura 4 muestra la nueva distribución de flujos al aplicar el modelo en la implantación de un sistema de gestión de residuos orgánicos en el que la captura de orgánico es del 70%. El cambio en el paradigma de gestión es muy evidente. El bioprocesado cubriría un 30% del total de residuos, mientras que el residuo enviado a vertedero descendería de casi un 60% del total al 34%. La cantidad en-

viada a compostaje descendería del 3.5% al 1.7% como consecuencia de la menor cantidad de materia orgánica disponible en el residuo mezclado inicial; los trenes de separación y clasificación serían significativamente menos eficientes en la separación de material compostable, si bien el material enviado a clasificación aumenta ligeramente en el nuevo escenario, aumentando también ligeramente la cantidad de material recuperado. La capacidad de incineración, por definición, se mantiene constante.

Para determinar el desempeño ambiental, el potencial de calentamiento global, medido en kg de CO<sub>2</sub> equivalente por tonelada de residuo gestionado por el sistema se presenta en la Figura 5. El sistema actual presenta una huella de carbono en torno a los 445 kg de CO<sub>2</sub> equivalente por tonelada de residuo (267 kg CO<sub>2</sub>eq si se

substrae la parte biogénica de las emisiones de CO<sub>2</sub>); una captura del 30% de la fracción orgánica reduciría esta huella un 9.4% hasta los 405 kg de CO<sub>2</sub>equivalente (219 kg CO<sub>2</sub>eq substrayendo el de origen biogénico), y un 21% hasta los 350 kg de CO<sub>2</sub> equivalente, si se captura un 70% del residuo orgánico (154 kg CO<sub>2</sub>eq substrayendo el de origen biogénico)

La contribución positiva principal a los valores de huella de CO<sub>2</sub> son principalmente directas (producidos por el propio sistema de gestión), tanto de CO<sub>2</sub> emitido en la incineración y en los tratamientos biológicos, como de metano emitido en el vertedero (en el que se supone una captura de biogás de vertedero del 15%). Las contribuciones negativas provienen de la electricidad neta producida por la incineración y el biogás de vertedero, el gas renovable inyectado en red producido



a partir de biogás de la digestión anaerobia de residuos orgánicos y de los materiales recuperados. Como se observa en la Figura 6, la contribución directa de vertedero e incineradora desciende al aumentar la separación de residuos orgánicos; la producción de electricidad neta desciende ligeramente al reducir el biogás producido por el vertedero, si bien éste se ve compensado por la cantidad de gas renovable producido por el sistema.

### CONCLUSIONES

A nivel metodológico, hemos observado que ECR<sup>3</sup>-Madrid muestra una capacidad de adaptación rápida e intuitiva para el cálculo de indicadores ambientales para diferentes alternativas de gestión de residuos. Nuestra intención desde IMDEA Energía es seguir trabajando en el cálculo detallado de la huella de carbono y muchos otros indicadores de ciclo de vida, como la ecotoxicidad, toxicidad humana, además del balance energético y los costes asociados a cada alternativa. Desde nuestro punto de vista, ECR<sup>3</sup> debe evolucionar hacia el desarrollo de una aplicación de ecodiseño considerando un sistema global de economía circular, capaz de proponer soluciones locales optimizadas geográficamente, ambiental y económicamente.

Los resultados obtenidos con ECR<sup>3</sup>-Madrid muestran que la implantación de la recogida selectiva de la fracción orgánica presenta menor huella de carbono, especialmente si se substraen la fracción biogénica del CO<sub>2</sub> de la huella de carbono. Sin embargo, este resultado está muy restringido por el gran número de suposiciones de tipo teórico que se ha realizado sobre el sistema, si bien el indicador de huella de carbono evoluciona como se ha observado en

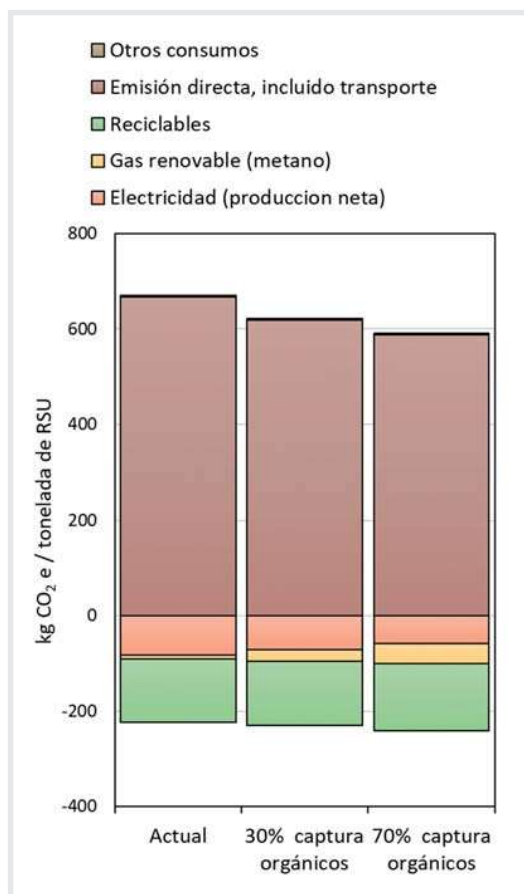


Figura 6. Desglose de la huella de carbono del sistema de gestión de residuos para el escenario actual y escenarios proyectados con un 30% y un 70% de captura de residuo orgánico recogido selectivamente

la mayoría de ciudades Europeas con sistemas de gestión similares.

Muchas de las suposiciones en las que se enmarca el estudio son en realidad debidas a la falta de información sobre el plan que Madrid ha previsto para el llamado quinto contenedor. Si bien su implantación se prevé general para toda la ciudad en un medio plazo, los objetivos ambientales que se persiguen no aparecen estudiados con detalle. Como ejemplo, se pueden discutir dos de las suposiciones principales que se han realizado en este artículo. En primer lugar, el destino de los residuos orgánicos una vez que el sistema se implante no involucra un digestor que sólo trate residuo separado sino que realizará codigestión de residuo mezclado, re-

síduos de poda y lodos de depuradora, lo que limita la aplicabilidad del proceso y el potencial de metano del residuo. Y, en segundo lugar, no se asegura la reducción del residuo enviado a vertedero, cuya efectividad se supone máxima en este trabajo, ya que en términos prácticos intervienen multitud de factores como la estacionalidad de los residuos, la respuesta del ciudadano en diferentes puntos de la ciudad, las tasas de generación por barrio, la densidad de población, etc.

*José Luis Gálvez Martos agradece la financiación recibida a través del programa People (Marie Curie Actions) del programa marco FP7/2007-2013 bajo el contrato n° 291803*

### REFERENCIAS

- Götze, R., Pivnenko, K., Boldrin, A., Scheutz, C., Astrup, T.F., 2016. Physico-chemical characterisation of material fractions in residual and source-segregated household waste in Denmark. *Waste Manag.* 54, 13–26. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.05.009>
- Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.M., Collins, W., Fuglestvedt, J., Huang, J., Koch, D., Lamarque, J.F., Lee, D., Mendoza, B., Nakajima, T., Robock, A., Stephens, G., Takemura, T., Zhang, H., 2013. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing., in: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, U.K. and New York, U.S.A.
- Tonini, D., Martínez-Sánchez, V., Astrup, T.F., 2013. Material Resources, Energy, and Nutrient Recovery from Waste: Are Waste Refineries the Solution for the Future? *Environ. Sci. Technol.* 47, 8962–8969. <https://doi.org/10.1021/es400998y>