

## **ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF MUNICIPAL SOLID WASTE MANAGEMENT ALTERNATIVES BY MEANS OF A LCA-GIS-WASTE TOOL. IDENTIFICATION OF KEY VARIABLES**

Bernad Beltrán, D.; Bovea Edo, M. D.; Gallardo Izquierdo, A.

Universitat Jaume I

Life Cycle Assessment (LCA) is the most suitable technique for evaluating the environmental performance of a municipal solid waste management system (MSWMS). However, a MSWMS has different aspects which are site-dependent (transport of waste or land use in landfill) that cannot be evaluated by the current commercial LCA software, but can be taken into account by applying Geographic Information Systems (GIS). With this purpose, a new tool that combines LCA and GIS (LCA-GIS-WASTE) has been developed and applied with the aim of identifying the key aspects in terms of contribution to the total environmental impact of a MSWMS.

As a baseline scenario, the current MSW management system implemented in a Spanish municipality has been defined, including primary and secondary inventory data for the stages of pre-collection, collection, transport, treatment and final disposal. Alternative scenarios have been defined by modifying aspects such as biowaste selective collection quantities, efficiency of sorting plants, landfill location, etc. After the application of the LCA-GIS-WASTE tool to all of the scenarios, the strengths and improvable aspects of the current waste management system have been pointed out. Besides, the key variables in a MSWMS system has been identified, from an environmental viewpoint.

**Keywords:** LCA; GIS; Waste management

## **EVALUACIÓN AMBIENTAL DE ALTERNATIVAS DE GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS MEDIANTE LA HERRAMIENTA LCA-GIS-WASTE. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES CLAVE**

Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es la técnica más adecuada para evaluar el desempeño medioambiental de sistema de gestión de residuos sólidos urbanos (SGRSU). No obstante, un SGRSU tiene diversos aspectos que son dependientes de la ubicación (transporte o uso del suelo en vertederos) que no pueden ser evaluados con las actuales herramientas informáticas de ACV, pero que pueden ser tenidos en cuenta mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG). Con este objetivo, una nueva herramienta que combina ACV y SIG (LCA-GIS-WASTE) ha sido desarrollada y aplicada con el objetivo de identificar los aspectos clave en términos de contribución al impacto ambiental total de un SGRSU.

Como escenario base, se ha definido el actual SGRSU implementado en un municipio español, incluyendo datos de inventario primarios y secundarios para las etapas de pre-recogida, recogida, transporte, tratamiento y disposición final. Se han definido escenarios alternativos modificando aspectos como la cantidad de biorresiduos recogidos selectivamente, eficiencia de las plantas de clasificación, ubicación del vertedero, etc. Tras la aplicación de la herramienta LCA-GIS-WASTE a todos los escenarios, se han señalado las fortalezas y aspectos mejorables del actual SGRSU. Además, se han identificado las variables clave de un SGRSU, desde el punto de vista ambiental.

**Palabras clave:** ACV; SIG; Gestión de residuos

Correspondencia: M<sup>a</sup> Dolores Bovea Edo. Dpto. Ingeniería Mecánica y Construcción, Universitat Jaume I. C.P. 12071. Castellón, España.

## 1. Introducción

La metodología de análisis de ciclo de vida (ACV) es la herramienta más adecuada para realizar la evaluación ambiental de un sistema de gestión de residuos urbanos (SGRU), ya que permite tener en cuenta el impacto que ocasionan todos los procesos y tratamientos involucrados en dicha gestión, facilitando la identificación de los aspectos del sistema que son susceptibles de mejora desde el punto de vista ambiental. Existen abundantes herramientas informáticas específicamente adaptadas a la evaluación ambiental de sistemas de gestión de residuos, como IWM-2 (McDougall et al., 2001), EASEWASTE (Kirkeby et al., 2005) o WISARD (The Ecobilan Group, 1999). Sin embargo, presentan inconvenientes a la hora de adaptar los modelos de inventario que incorporan a las necesidades de cualquier caso de estudio; modelar escenarios complejos, lo que implica hacer simplificaciones que alejan el modelo de la realidad; no permiten incorporar aspectos dependientes del espacio, como es el caso de la ubicación de las instalaciones de gestión de residuos o la consideración del uso de suelo.

Así pues, si se desea obtener resultados robustos y fiables asociados a sistemas de gestión de residuos reales, se detecta la necesidad de:

- Trabajar con datos de inventario propios del sistema de gestión de residuos objeto de estudio.
- Diseñar una herramienta informática que permita realizar la evaluación ambiental de sistemas de gestión de residuos de manera estructurada y sencilla, seleccionar la ubicación específica de las instalaciones de gestión de residuos, y que tenga en cuenta aspectos no incluidos en las herramientas informáticas comparadas, como la categoría de impacto uso del suelo o las rutas óptimas en la etapa de transporte.

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente, se ha diseñado una herramienta denominada **GIS-LCA-WASTE** que combina la metodología ACV con las ventajas que ofrecen los sistemas de información geográfica (SIG). El software *ArcGIS* (ESRI, 2006) dispone de un entorno (*Model Builder*) que dispone de aplicaciones y lenguaje de programación propio para diseñar herramientas de trabajo personalizadas, encadenar herramientas de geoprocésamiento de manera que la información derivada de un proceso se convierta de manera automática en la información de entrada del siguiente proceso, etc. Además, *ArcGIS* dispone de otras herramientas que permiten ubicar instalaciones de gestión de residuos en un plano referenciado espacialmente, calcular rutas de transporte óptimas a partir de información de carreteras, incorporar tablas con datos de inventario propios, intersecar información geográfica incluida en diferentes mapas y obtener resultados en diversos formatos.

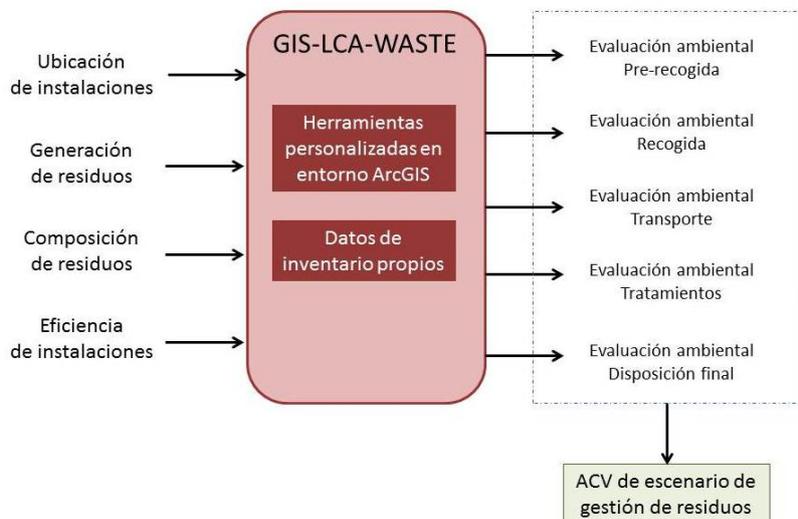
El objeto de esta comunicación es aplicar la herramienta GIS-LCA-WASTE para comparar el desempeño ambiental que supone la incorporación de la recogida selectiva del biorresiduo en un sistema de gestión de residuos de un municipio español. Para ello, se han diseñado siete escenarios alternativos al vigente, y se han modelado, analizado y comparado con el actual sistema implantado en dicho municipio.

## 2. Descripción de la herramienta

Desde el punto de vista conceptual, la herramienta informática diseñada se representa en la Figura 1. A partir de una serie de información de entrada a introducir por el usuario (ubicación de las instalaciones, cantidad y composición de los residuos generados y eficiencia de las instalaciones), **GIS-LCA-WASTE** realiza las operaciones

matemáticas necesarias entre esta información y datos de inventario propios, para realizar la evaluación ambiental de las distintas etapas de un sistema de gestión de residuos: pre-recogida, recogida, transporte, tratamientos y disposición final.

Figura 1. Definición herramienta GIS-LCA-WASTE



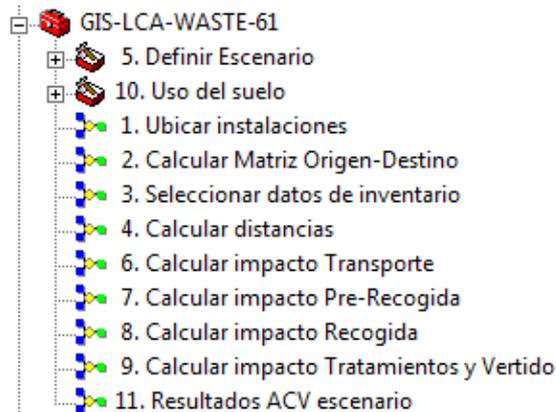
La herramienta **GIS-LCA-WASTE**, permite al usuario:

- Definir, en un entorno amigable, y de manera sencilla y rápida, una importante variedad de escenarios de gestión de residuos, a partir de la correspondiente información de entrada.
- Representar escenarios en los que se generan diferentes fracciones de residuos: biorresiduos, papel-cartón, vidrio, plásticos, metales, materia orgánica estabilizada y resto.
- Definir escenarios con diversos sistemas de recogida de residuos, considerando la recogida separada de papel-cartón, vidrio, envases y biorresiduos.
- Definir escenarios que consten de una importante variedad de instalaciones de gestión de residuos, incluyendo estación de transferencia, plantas de clasificación de residuos, plantas de tratamiento biológico, de reciclaje de materiales y vertederos de residuos urbanos.
- Seleccionar los datos de inventario que considere apropiados para cada proyecto.
- Ubicar de forma manual las instalaciones de gestión de residuos, dentro del mapa digital correspondiente.
- Considerar, en la etapa de transporte de los residuos, las rutas óptimas desde el punto de vista de la distancia.
- Obtener indicadores ambientales, que definan el comportamiento ambiental del escenario de gestión de residuos definido: acidificación, eutrofización, calentamiento global, agotamiento de capa de ozono, oxidación fotoquímica y uso del suelo.
- Incorporar al estudio de ACV una categoría de impacto habitualmente excluida de este tipo de investigaciones: el uso del suelo. El método para el cálculo de esta categoría ha sido descrito en Bernad-Beltrán et al. (2012).

- Representar de manera gráfica los resultados en formato mapa, para todos los indicadores ambientales

**GIS-LCA-WASTE** consta de un conjunto de herramientas personalizadas elaboradas para operar en el entorno de *ArcGIS*, mediante la aplicación *Model Builder*. Dispone de 11 sub-herramientas que, empleadas de manera sucesiva, permiten el desarrollo completo de la metodología de ACV aplicada al contexto de la gestión de los residuos (Figura 2). Las sub-herramientas que forman **GIS-LCA-WASTE** están debidamente documentadas mediante los correspondientes textos de ayuda y un manual de usuario.

**Figura 2. Herramienta GIS-LCA-WASTE**



La herramienta elaborada es fácilmente compartible entre usuarios de *ArcGIS*. **GIS-LCA-WASTE** se almacena en disco como un archivo de extensión “.*tbx*”. Cualquier usuario con licencia para emplear *ArcGIS* puede hacer uso de las sub-herramientas incluidas en **GIS-LCA-WASTE**.

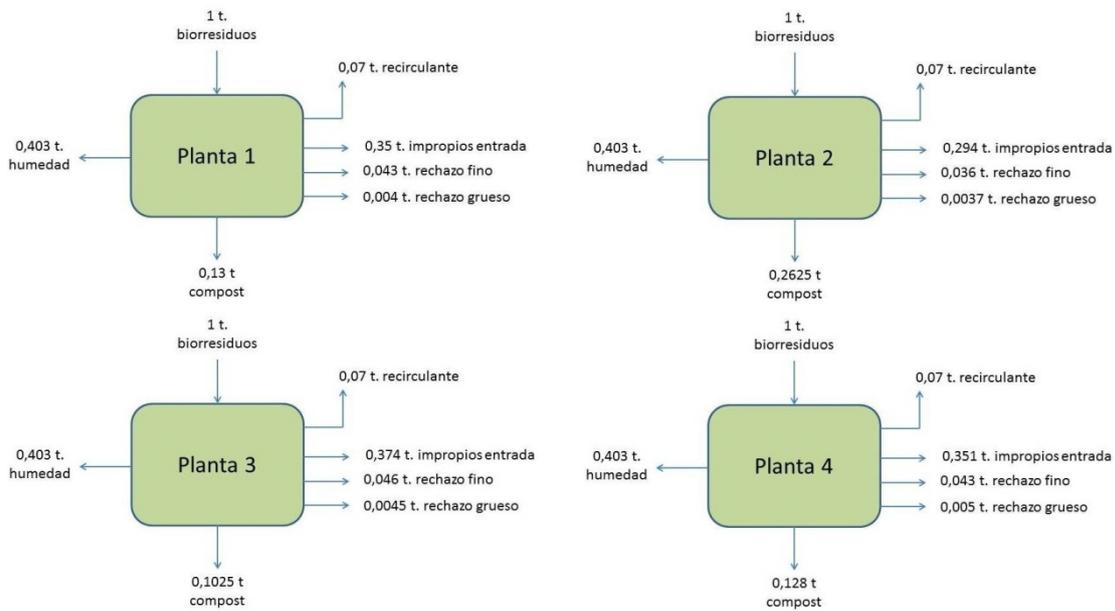
### 3. Datos de inventario

Uno de los inconvenientes detectados en las herramientas informáticas de ACV específicamente diseñadas para evaluar sistemas de gestión de residuos, era la poca flexibilidad que ofrecían a la hora de incorporar o adaptar los datos de inventario a los propios del caso de estudio.

**GIS-LCA-WASTE** permite definir datos de inventario propios al usuario, que son incorporados a la herramienta en formato *Excel* (.xls). Aún así, incorpora datos por defecto obtenidos directamente de las empresas encargadas de la gestión de los residuos en el área objeto de estudio, por lo que están adaptados al caso de España.

Los consumos y eficiencias de las plantas que realizan el pre-tratamiento de las distintas fracciones son los descritos en Bernad-Beltrán et al. (2012). Además, en este trabajo se ha hecho especial hincapié en definir el tratamiento de compostaje de la fracción biorresiduo, ya que es el criterio utilizado para definir los escenarios alternativos del caso de aplicación. Para ello, se ha realizado un inventario de dicho proceso diferenciando entre distintos tipos de plantas: para biorresiduos recogidos selectivamente mediante túneles cerrados (Planta 1), de gran capacidad para biorresiduos recogidos selectivamente mediante pilas en nave abierta (Planta 2), para biorresiduos recogidos en masa mediante túneles cerrados (Planta 3) y de pequeña capacidad para biorresiduos recogidos selectivamente mediante pilas en nave abierta (Planta 4). En la Figura 3 se muestran los balances de masas de los distintos tipos de plantas de compostaje considerados en esta investigación.

**Figura 3. Balances de masas para diferentes tipologías de plantas de compostaje**



Fuente: empresas encargadas de la gestión de los residuos en la región objeto de estudio

Los consumos de las plantas de compostaje se muestran en la Tabla 1. Las emisiones gaseosas del proceso de compostaje se han tomado de Martínez-Blanco et al. (2010) y de Boldrin et al. (2010). La cantidad de nutrientes presente en el compost, en función del sistema de recogida para los biorresiduos, se ha tomado de Smith et al. (2001).

**Tabla 1. Consumos de diferentes tipos de plantas de compostaje**

Planta	Electricidad (kWh/t)	Diesel (l/t)	Agua (l/t)
1	12.96	1.54	7180
2	48.21	40.05	350
3	19.67	0.355	50
4	9.49	6.52	n/d

Fuente: empresas encargadas de la gestión de los residuos en la región objeto de estudio

Por último, los procesos de reciclaje de materiales, así como el vertido de las diferentes fracciones de residuos, han sido definidos a partir de información adaptada de la base de datos Ecoinvent (2007).

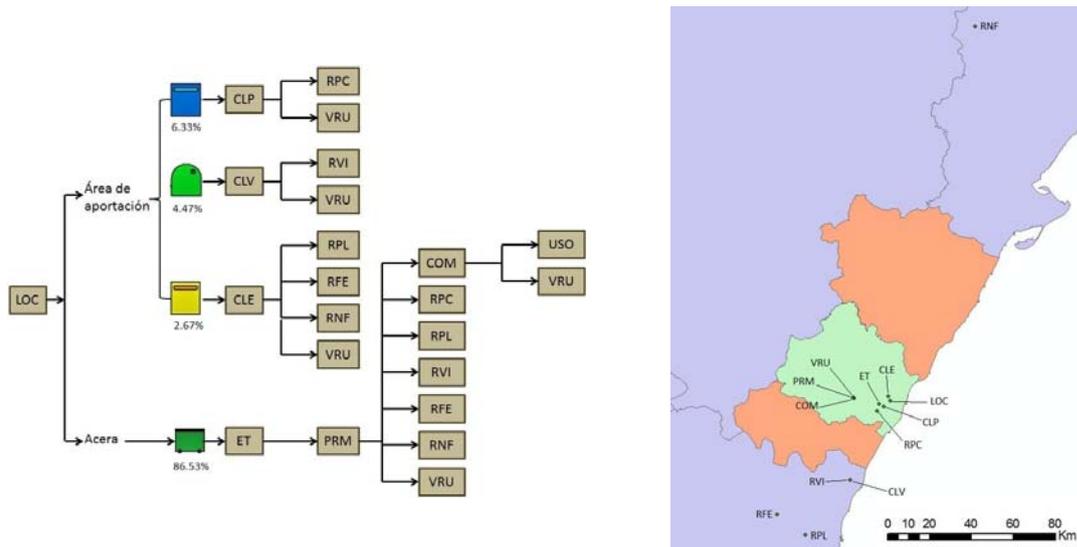
#### 4. Definición y análisis del escenario base

El escenario base que se toma como referencia para este estudio (**Escenario 0**) corresponde al sistema de gestión de residuos implantado actualmente en un municipio español de 180.000 habitantes, con la composición de residuos mostrada en la Tabla 2. En área de aportación se recogen las fracciones papel-cartón, vidrio y envases, mientras que a nivel de acera recoge la fracción resto, con las cantidades indicadas en la Figura 4, junto con la ubicación de las instalaciones de gestión.

**Tabla 2. Composición de residuos**

Fracción	Biorresiduos	Papel-cartón	Vidrio	Plástico	Metal férrico	Metal no férrico	Otros
%	44.06	21.18	6.93	10.59	3.37	0.74	13.13

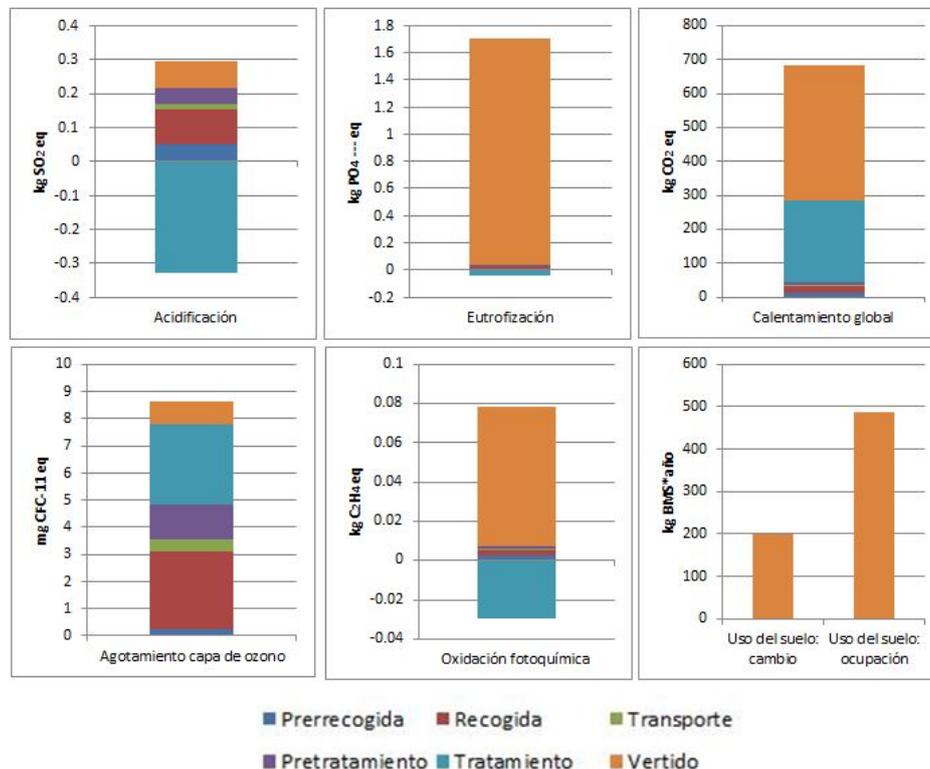
**Figura 4. Esquema del escenario a analizar y ubicación de instalaciones a modelar en GIS-LCA-WASTE**



Localidad (LOC), Estación de Transferencia (ET), Planta de Recuperación de Materiales (PRM), Planta Clasificadora de Papel (CLP), Planta Clasificadora de Vidrio (CLV), Planta Clasificadora de Envases (CLE), Reciclaje de Papel-Cartón (RPC), Reciclaje de Vidrio (RVI), Reciclaje de plásticos (RPL), Reciclaje de metal férreo (RFE), Reciclaje de metal no férreo (RNF), COM (Planta de Compostaje), VRU (Vertedero de residuos urbanos), USO (Uso del compost en agricultura).

Una vez modelado este escenario en **GIS-LCA-WASTE**, se obtienen los resultados de la evaluación ambiental por etapa de ciclo de vida mostrados en la Figura 5.

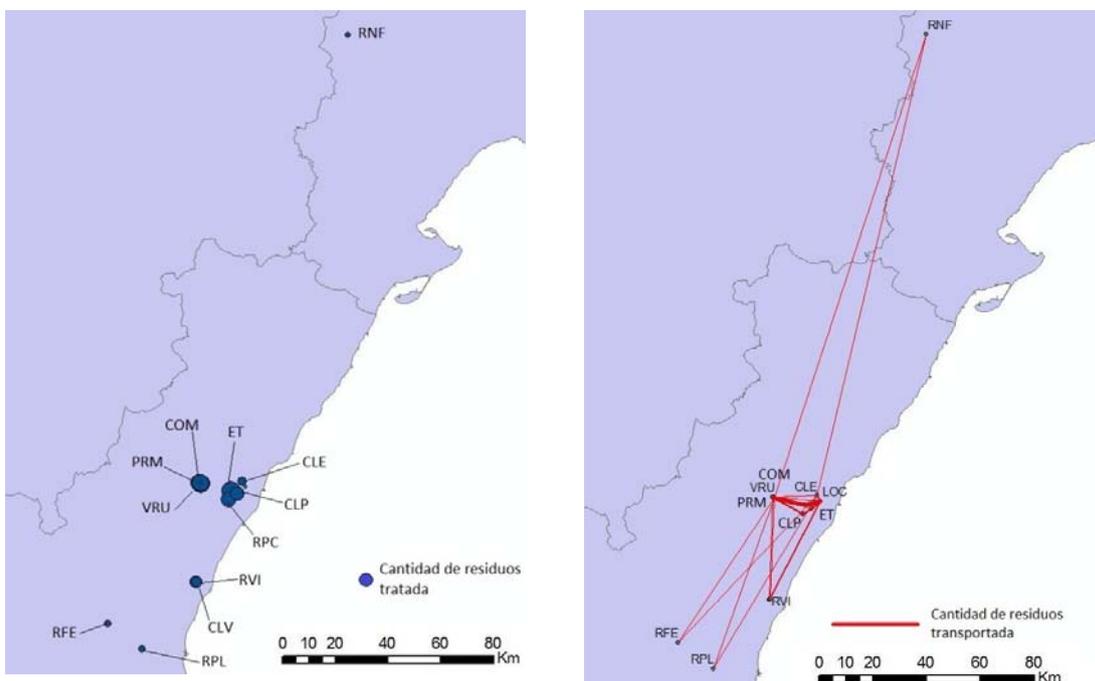
**Figura 5. Indicadores ambientales por categoría de impacto y etapa del ciclo de vida**



Además, **GIS-LCA-WASTE** permite obtener diferentes mapas: cantidad de residuos tratada en cada instalación, cantidad de residuos transportada por cada ruta,

contribución de cada una de las instalaciones o rutas a las distintas categorías de impacto, etc. El grosor de las líneas o puntos representan una escala cualitativa.

**Figura 6. Mapas obtenidos en GIS-LCA-WASTE para el Escenario 0**



El vertido es la etapa de ciclo de vida con mayor influencia sobre los resultados del Escenario 0, ya que afecta de manera importante a las seis categorías de impacto estudiadas. El principal motivo de esta influencia tiene que ver con el hecho de que, en este escenario, el 62.7% de los residuos generados son destinados al vertido. Las fracciones cuyo vertido mayor influencia tiene sobre los resultados son los biorresiduos, el papel-cartón y los plásticos. La etapa de tratamiento de residuos también tiene influencia importante sobre los resultados del escenario global, ya que afecta a cuatro de las categorías de impacto estudiadas: acidificación, calentamiento global, agotamiento de capa de ozono y oxidación fotoquímica. Con impacto neto sobre el ambiente, los tratamientos con mayor influencia son el reciclaje de papel-cartón y el compostaje. En cambio, los tratamientos que aportan mayor carga evitada son el reciclaje de los distintos metales y del plástico.

La evaluación ambiental del Escenario 0 permite detectar que el vertido tiene una influencia capital sobre los resultados finales. Reducir la cantidad de residuos vertida permitirá reducir el impacto ocasionado sobre las seis categorías de impacto analizadas. Concretamente, la cantidad de biorresiduos, papel-cartón o plásticos destinados a vertido se puede reducir incrementando las cantidades de estas fracciones recogidas de manera selectiva en acera. Este incremento aumentaría a su vez las cantidades de estos materiales destinados a procesos de reciclaje.

Por otra parte, el compostaje de los biorresiduos recogidos en masa es un tratamiento mayoritario dentro del sistema de gestión de residuos actual, ya que a él se destinan el 35.77% del total de residuos generados. Este tratamiento genera grandes cantidades de materia orgánica estabilizada con destino vertedero. Esta cantidad se puede reducir mejorando la eficiencia de la planta de compostaje empleada, que actualmente transforma en compost el 10.25% de los residuos que recibe, destinando a vertido en forma de materia orgánica estabilizada el 42.45%.

## 5. Definición y análisis de escenarios alternativos

A partir de las conclusiones del apartado anterior, se han definido siete escenarios alternativos (**Escenario 1 – Escenario 7**), con el fin de identificar qué cambios presentan mejor comportamiento ambiental. Se describen a continuación:

- En el **Escenario 1** se considera la incorporación de la recogida selectiva del biorresiduo, a nivel de acera en un contenedor aparte junto a la fracción resto, tal y como se fomenta desde la legislación vigente a nivel europeo (Directiva 2008/98), nacional (Ley 22/2011) y autonómico (PIR, 2010). Estos biorresiduos son transportados de manera directa a una planta de compostaje con las características de la Planta 1. Los biorresiduos recogidos en masa van a una planta con las características de la Planta 3. A partir de la realización de encuestas propias se observa que la incorporación de la recogida selectiva del biorresiduo tiene una serie de consecuencias sobre las cantidades recogidas del resto de fracciones: la cantidad de papel-cartón se incrementa desde un 6.33% hasta un 6.46%, mientras que la de vidrio desciende desde un 4.47% a un 3.47% y la de envases desciende desde un 2.67% a un 2.57%.
- En el **Escenario 2** se plantea un incremento del 25% en la cantidad de papel-cartón recogida selectivamente a nivel de área de aportación. La cantidad recogida en este contenedor pasará de un 6.33% a un 7.91%. Se incrementa la cantidad de papel-cartón destinada a reciclaje y se disminuye la destinada a vertido.
- En el **Escenario 3** se plantea un incremento del 25% en la cantidad de vidrio recogida selectivamente a nivel de área de aportación. La cantidad recogida en este contenedor pasará de un 4.47% a un 5.58%. Se incrementa la cantidad de vidrio destinada a reciclaje y se disminuye la destinada a vertido.
- En el **Escenario 4** se plantea un incremento del 25% en la cantidad de envases recogida selectivamente a nivel de área de aportación. La cantidad recogida en este contenedor pasará de un 2.67% a un 3.34%. Se incrementan la cantidad de plásticos, metal férreo y metal no férreo destinadas a reciclaje y se disminuyen las destinadas a vertido.
- En el **Escenario 5** se plantea un incremento simultáneo del 25% en la cantidad de papel-cartón, vidrio y envases recogidos selectivamente a nivel de área de aportación. La cantidad recogida en el contenedor de envases se incrementará desde un 2.67% hasta un 3.34%, en el contenedor de vidrio desde un 4.47% a un 5.58% y en el contenedor de papel-cartón desde un 6.33% hasta un 7.91%. Se incrementan por tanto las cantidades de todas las fracciones reciclables destinadas a reciclaje y se disminuyen las destinadas a vertido.
- En el **Escenario 6** se plantea una mejora de la eficiencia en la recuperación de las distintas fracciones reciclables dentro de la planta de recuperación de materiales (PRM). Los nuevos valores de eficiencia serán, por tanto, los siguientes: 3.97% para el papel-cartón, 0.45% para los plásticos, 2.16% para el metal férreo y 0.48% para el metal no férreo. Las fracciones de residuos recogidas selectivamente siguen el mismo recorrido que el descrito en el Escenario 0. Se incrementan por tanto las cantidades de todas las fracciones reciclables destinadas a reciclaje y se disminuyen las destinadas a vertido.
- Por último, en el **Escenario 7** se plantea una mejora simultánea del 3% de la eficiencia en la recuperación de las distintas plantas de clasificación: de papel-cartón, de vidrio y de envases. Los nuevos valores de eficiencia son los siguientes: 98.9% para el papel-cartón en la CLP; 89.61% para el vidrio en la CLV; y 58.1% para el plástico, 10.08% para el metal férreo y 2.2% para el metal no férreo en la CLE. Las fracciones de residuos recogidas selectivamente siguen el mismo recorrido que el descrito en el Escenario 0. Se incrementan por tanto las

cantidades de todas las fracciones reciclables destinadas a reciclaje y se disminuyen las destinadas a vertido.

Tras modelar cada uno de estos escenarios en **GIS-LCA-WASTE**, se obtienen los porcentajes de mejora o empeoramiento de cada escenario respecto de los resultados del Escenario 0 mostrados en la Tabla 3. Un valor positivo supone una mejora de los resultados de esa categoría respecto del Escenario 0. Un valor negativo supone un empeoramiento de los resultados de la categoría de impacto.

**Tabla 3. Mejora o empeoramiento de las alternativas al escenario base**  
**Mejora respecto del escenario base (escenario 0)**

Escenario	ACD	EUT	GWP	OLD	OXF	CHG	OCC
1	-55.0	+2.6	+1.6	+1.8	+0.5	+3.7	+4.7
2	-7.5	+2.8	-1.5	-10.8	+5.5	+2.4	+4.7
3	+97.8	+0.1	-0.2	0	+2.4	+1.5	+4.7
4	+54.1	+1.0	+1.1	+0.8	+5.2	+4.7	+4.7
5	+134.0	+3.8	-0.8	-10.5	+12.2	+4.7	+4.7
6	+127.7	+1.8	+1.0	+0.3	+14.5	+1.9	+4.7
7	+17.8	+0.6	-0.1	-1.0	+1.3	+0.6	+4.7

ACD: Acidificación, EUT: Eutrofización, GWP: Calentamiento global, OLD: Agotamiento de la capa de ozono, CHG: Uso del suelo, impacto debido al cambio, OCC: Uso del suelo, impacto debido a la ocupación.

En relación al **Escenario 1**, la reducción de las cantidades destinadas a reciclaje de vidrio y metal no férnico (del 22.4% y 1.5%, respectivamente) tienen especial influencia sobre la disminución de carga evitada en la acidificación, ya que estos son los tratamientos con mayor relevancia sobre esta categoría. Por otra parte, la reducción de las cantidades destinadas a reciclaje de papel-cartón y metal férnico (del 1.4% y 0.8%, respectivamente), unidas a la ya mencionada disminución de la cantidad de metal no férnico, ocasionan el incremento del impacto en la oxidación fotoquímica. La reducción del 61.6% en la cantidad de biorresiduos destinados a vertido, y del 1% en el caso del papel-cartón, son los aspectos con mayor influencia sobre la disminución del impacto ocasionado sobre la eutrofización, el calentamiento global y el agotamiento de la capa de ozono. La reducción del 3.8% en la cantidad total de residuos destinados a vertido constituye la única causa de la reducción del impacto ocasionado por el uso del suelo, tanto en relación al cambio como en relación a la ocupación.

En relación al **Escenario 2**, el incremento del 17.6% en la cantidad de papel-cartón destinada a reciclaje tiene influencia decisiva y negativa sobre el calentamiento global y el agotamiento de la capa de ozono. Además, el incremento de la recogida selectiva del papel-cartón en un 25% es el causante del empeoramiento del 7.5% en la acidificación (los efectos de las etapas de tratamiento y vertido se compensan mutuamente). La reducción del 12.3% de la cantidad de papel-cartón destinado a vertido tiene influencia decisiva sobre la mejora en la eutrofización, ya que el vertido de 1 tonelada de papel-cartón tiene contribución neta sobre esta categoría. La reducción del 2.5% en la cantidad total de residuos destinados a vertido constituye la única causa de la reducción del impacto ocasionado por el uso del suelo, tanto en relación al cambio como en relación a la ocupación.

En relación al **Escenario 3**, el incremento de la cantidad de vidrio destinada a reciclaje tiene una influencia decisiva sobre la mejora en la acidificación, en la eutrofización y en la oxidación fotoquímica, ya que este tratamiento aporta carga evitada neta en

estas categorías de impacto. Por otra parte, el reciclaje de vidrio contribuye al impacto en las etapas de calentamiento global y agotamiento de la capa de ozono. El incremento de la cantidad de vidrio destinada a reciclaje (unido a la escasa influencia que tiene la reducción del vidrio a vertido sobre estas categorías) ocasiona el incremento del impacto producido sobre las mismas.

En relación al **Escenario 4**, el incremento de las cantidades de plásticos, metal férriico y metal no férriico destinados a reciclaje tiene una influencia decisiva sobre la mejora en cinco de las seis categorías de impacto evaluadas (todas excepto el uso del suelo), ya que para ellas son tratamientos que aportan carga evitada. Además, el desvío de estas mismas cantidades del flujo de vertido directo influye también de manera decisiva a las mejoras en las seis categorías. Por una parte, el vertido de las tres fracciones mencionadas contribuye al impacto en la acidificación, eutrofización, calentamiento global, agotamiento de la capa de ozono y oxidación fotoquímica. Por otra, la reducción del 0.8% en la cantidad total de residuos destinados a vertido constituye la única causa de la reducción del impacto ocasionado por el uso del suelo, tanto en relación al cambio como en relación a la ocupación.

En relación al **Escenario 5**, el desvío de cantidades de materiales reciclables del flujo directo a vertido tiene consecuencias beneficiosas para las seis categorías de impacto. El reciclaje del papel-cartón contribuye de manera importante al impacto sobre la acidificación, el calentamiento global, el agotamiento de la capa de ozono y la oxidación fotoquímica. El reciclaje del vidrio también contribuye de manera importante al impacto sobre el calentamiento global y el agotamiento de la capa de ozono, aunque contribuye con carga evitada a la acidificación. El reciclaje del resto de fracciones (plástico, metal férriico y metal no férriico) contribuye siempre con carga evitada para las cinco categorías de impacto evaluadas. La carga evitada que aportan el reciclaje del vidrio, plástico, metal férriico y metal no férriico compensan en el caso de la acidificación y la oxidación fotoquímica el impacto con el que contribuye el reciclaje del papel-cartón. La mejora de la acidificación es tan elevada porque el reciclaje de las distintas fracciones es, con diferencia, el aspecto que más carga evitada aporta a esta categoría. En contraste, la carga evitada que aportan el reciclaje del plástico, metal férriico y metal no férriico, no es capaz de compensar el impacto que ocasiona el reciclaje de papel-cartón sobre el calentamiento global y el agotamiento de la capa de ozono. Por este motivo se observan empeoramientos en los resultados globales de estas dos categorías.

En relación al **Escenario 6**, el incremento de las cantidades destinadas al reciclaje de plásticos, metal férriico y metal no férriico tiene una influencia decisiva sobre las mejoras en la acidificación, el calentamiento global, el agotamiento de la capa de ozono y la oxidación fotoquímica. Para estas cuatro categorías de impacto, la carga evitada que aportan estos tratamientos compensa el incremento del impacto que ocasiona el reciclaje de papel-cartón. Además, la reducción de las cantidades destinadas a vertido tiene influencia decisiva sobre las seis categorías de impacto evaluadas, siendo esta influencia más evidente en el caso de la eutrofización y en el uso del suelo.

Por último, en relación al **Escenario 7**, el incremento de las cantidades destinadas al reciclaje de plásticos, metal férriico y metal no férriico tiene una influencia decisiva sobre las mejoras en la acidificación, el calentamiento global, el agotamiento de la capa de ozono y la oxidación fotoquímica. Para estas cuatro categorías de impacto, la carga evitada que aportan estos tratamientos compensa el incremento del impacto que ocasiona el reciclaje de papel-cartón. Además, la reducción de las cantidades destinadas a vertido tiene influencia decisiva sobre las seis categorías de impacto evaluadas, siendo de nuevo esta influencia más evidente en el caso de la eutrofización y el uso del suelo. En comparación con los resultados del Escenario 6, desde el punto de vista ambiental, resulta más beneficioso incrementar la eficiencia en la

recuperación de la planta de recuperación de materiales que de las distintas plantas de clasificación (en el Escenario 6 se obtienen mejoras para las seis categorías de impacto, mientras que en el Escenario 7 se obtienen mejoras únicamente en cuatro de ellas). En primer lugar, la cantidad de residuos entrante en la planta de recuperación de materiales es mucho mayor que la cantidad entrante en las plantas de clasificación, con lo que los efectos de esta mejora en la eficiencia tendrán mayores consecuencias si se realizan sobre la planta de recuperación de materiales. Además, las cantidades recuperadas en la planta de recuperación de materiales son mucho menores, con lo que el margen de mejora en la eficiencia de esta planta es mucho mayor que el margen de mejora de las diferentes plantas de clasificación.

## 7. Conclusiones

La principal conclusión que se extrae de esta comunicación es que la integración entre ACV y SIG ha permitido la elaboración de una herramienta que sirve para realizar la evaluación ambiental de escenarios de gestión de residuos de manera estructurada en un entorno visual y amigable. La herramienta ha sido elaborada mediante la aplicación *Model Builder* de ArcGIS y ha sido denominada **GIS-LCA-WASTE**. Esta herramienta permite trabajar con datos de inventario propios, realizar la evaluación ambiental de una importante variedad de escenarios de gestión de residuos, obtener resultados para seis indicadores ambientales (incluido el uso del suelo) y en diversos formatos y trabajar con información dependiente de la ubicación.

En relación a las evaluaciones ambientales realizadas, el aspecto que más influencia tiene sobre los resultados del **Escenario 0** es el hecho de que el 62.72% de los residuos entrantes en el sistema terminen en el vertedero de residuos urbanos. De manera más concreta, las fracciones cuyo vertido más contribuye al impacto, ya que afectan a todas las categorías evaluadas, son el papel-cartón, la materia orgánica estabilizada procedente de las plantas de compostaje, los biorresiduos y la fracción otros. Además, se observa que las cantidades de materiales presentes en los residuos que son destinados a tratamientos de reciclaje son bajas, con lo que se está desaprovechando el potencial de los materiales presentes en los residuos.

Considerando la implantación de la recogida selectiva del biorresiduo (**Escenario 1**), se observa que este sistema de recogida proporcionaría mejoras ambientales en la eutrofización (1.6%), en el calentamiento global (2.6%), en el agotamiento de la capa de ozono (1.1%) y en el uso del suelo para sus dos indicadores (3.8%), siempre en relación al Escenario 0. La reducción del 61.6% en la cantidad de biorresiduos destinados a vertido es el aspecto con más influencia sobre la mejora observada en estas categorías. Por otra parte, la incorporación de la recogida selectiva del biorresiduo desencadenaría empeoramientos en la acidificación (55%) y la oxidación fotoquímica (2%), en relación al Escenario 0. Al solicitar al ciudadano la separación en origen de una nueva fracción, se observa que las cantidades recolectadas en otros contenedores de recogida selectiva disminuyen, y por lo tanto disminuyen también las cantidades de vidrio, plásticos, metal férrico y metal no férrico destinadas a tratamientos de reciclaje. La reducción de estas cantidades destinadas a reciclaje son las causantes del empeoramiento en estas dos categorías.

En relación al resto de estrategias propuestas, se observa que únicamente dos de ellas proporcionan mejoras para las seis categorías de impacto evaluadas de manera simultánea: el **Escenario 4** y el **Escenario 6**, es decir, incrementar en un 25% la cantidad de envases recolectada en área de aportación, o incrementar en un 25% la eficiencia en la separación de la planta de recuperación de materiales. En general, se obtienen resultados más satisfactorios (mejoras mayores) para la segunda de estas estrategias.

## REFERENCIAS

- Bernad-Beltrán, D., Bovea, M.D., Gallardo, A., Colomer, F.J. 2012. Integración de ACV y SIG para la evaluación ambiental de sistemas de gestión de residuos. 16th International Congress on Project Engineering. Valencia, 2012.
- Boldrin, A., Hartling, K., Laugen, M., Christensen, T. 2010. Environmental inventory modelling of the use of compost and peat in growth media preparation. Resources, Conservation and Recycling, 54, 1250-1260.
- Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo sobre residuos. 2008. Diario Oficial de la Unión Europea. L312, 3-30.
- Ecoinvent, 2007. Ecoinvent Data v2. Ecoinvent Centre, Swiss Centre for Life Cycle Inventory.
- ESRI. 2006. Using ArcGIS Desktop.
- Kirkeby, J.T., Hansen, T.L., Birgisdóttir, H., Bhandar, G.S., Hauschild, M.Z., & Christensen, T.H. 2005. Environmental assessment of solid waste systems and technologies: EASEWASTE. Waste Management and Research, 24, 3-15.
- Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados. Boletín Oficial del Estado núm 181, 85650-85705.
- Martínez-Blanco, J., Colón, J., Gabarrell, X., Font, X., Sánchez, A., Artola, A., Rieradevall, J. 2010. The use of life cycle assessment for the comparison of biowaste composting at home and full scale. Waste Management, 30, 983-994.
- McDougall, F., White, P., Franke, M., Hindle, P. 2001. Integrated Solid Waste Management. A life cycle inventory. Procter & Gamble Technical Centres Limited.
- Revisión y Actualización del Plan Integral de Residuos Comunidad Valenciana (PIR10). Dirección General del Cambio Climático, 2010.
- Smith, A., Brown, K., Ogilvie, S, Ruston, K., Bates, J. 2001. Waste management options and climate change. Final report to the European Commission, Directorate Generale Environment.
- The Ecobilan Group. 1999. Waste Integrated Systems Assessment for Recovery and Disposal. Reference Guide. *ECOBILAN*.