ANÁLISIS COMPARATIVO DE HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA APLICADAS A LA EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE GESTIÓN DE RESIDUOS URBANOS

María D Bovea

David Bernad

Antonio Gallardo

Francisco J Colomer

Departamento de Ingeniería Mecánica y Construcción. Universitat Jaume I de Castellón.

Abstract

Life Cycle Analysis (LCA) methodology is considered the most efficient tool to obtain an objective quantification of the environmental impacts caused by waste management systems.

Along the last years, a wide variety of software which facilitate the performance of LCA studies, specifically applied to waste management, have been developed. Nevertheless, not only the functionalities and scope but also the inventory models which they provide are very diverse. Therefore, in order to obtain robust and reliable results, it becomes critical to know the possibilities and limitations of these tools, as well as the influence that the applied tool can have on the obtained results.

Thus, the object of this paper is performing a complete comparative analysis of the main software –not only commercial but also free software- available to apply LCA methodology to the environmental evaluation of waste management systems. All these tools will be applied on the same study case, in order to detect the influence of the applied tool on the results, and to be able to select the most adaptable one for the performance of these types of studies at a national level.

Keywords*: life cycle analysis; LCA; waste management system*

Resumen

La metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) se considera como la herramienta más eficaz para obtener una cuantificación objetiva del impacto ambiental provocado por los sistemas de gestión de residuos.

En los últimos años se ha desarrollado una amplia variedad de herramientas informáticas que facilitan la realización de estudios de ACV aplicados a la gestión de residuos. Sin embargo, tanto las funcionalidades y ámbito de aplicación como los modelos de inventario que incorporan, son muy diversos. Por lo tanto, con el fin de obtener resultados robustos y fiables, resulta crucial conocer las posibilidades y limitaciones de dichas herramientas, y la influencia que la herramienta aplicada puede llegar a tener sobre los resultados obtenidos.

Así pues, el objeto de esta comunicación es realizar un análisis crítico de las principales herramientas informáticas, tanto comerciales como software libre, que existen para aplicar la metodología ACV a la evaluación ambiental de sistemas de gestión de residuos. Todas ellas se aplicarán a un mismo caso de estudio, con el fin de determinar cómo influye la

herramienta aplicada en los resultados, y poder seleccionar aquélla que mejor se adapte a la realización de estudios de este tipo a nivel nacional.

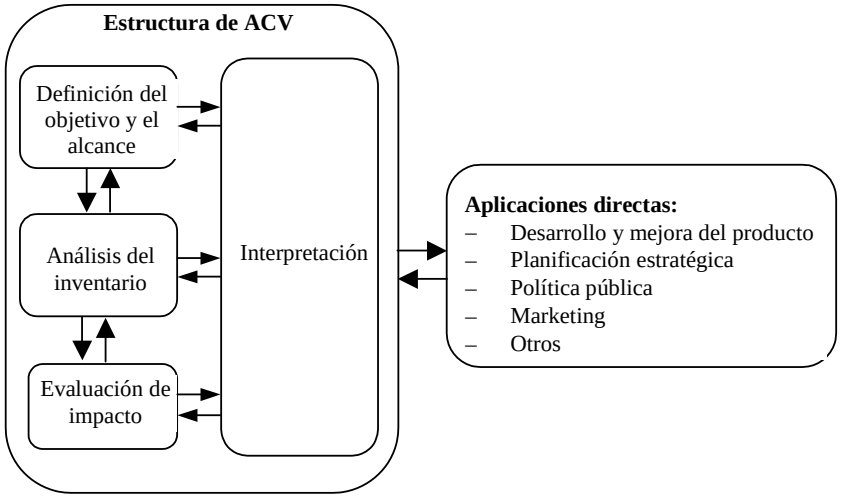
Palabras clave: *análisis de ciclo de vida; ACV; sistema de gestión de residuos*

1. Introducción

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es un proceso objetivo destinado a evaluar los impactos ambientales asociados a un producto, proceso o actividad, identificando y cuantificando las energías y materiales utilizados, así como las emisiones generadas y los residuos vertidos al ambiente (UNE-EN-ISO 14040-44, 2006).

Las etapas que propone esta norma se muestran en la Figura 1.

Figura 1: Esquema de un ACV según la norma UNE-EN-ISO 14040 (2006).

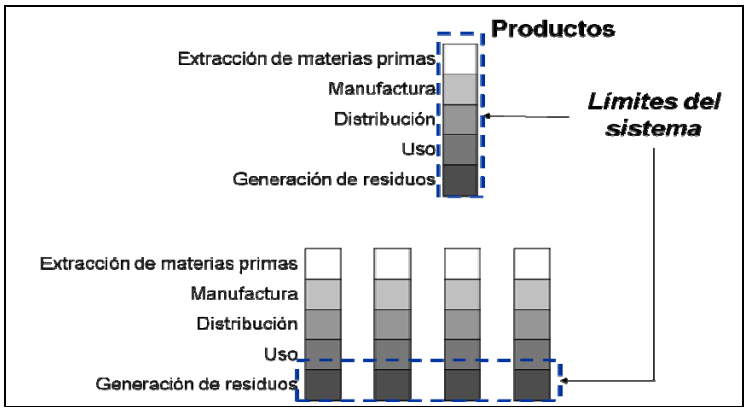


Desde sus inicios, esta metodología se ha aplicado principalmente a la evaluación del comportamiento ambiental de los productos. Sin embargo, dado su potencial, en los últimos años se ha ampliado su campo de aplicación a la evaluación ambiental de servicios como el de gestión de residuos (Finnveden et al., 2010). La Figura 2 muestra la diferencia entre los límites del sistema producto y del sistema gestión de residuos (SGR).

El objeto de esta comunicación es realizar un análisis comparativo de las principales herramientas informáticas, tanto comerciales como *software* libre, que existen para aplicar la metodología ACV a la evaluación ambiental de sistemas de gestión de residuos. Se comparan aspectos de tipo funcional (país, precio, entorno con el usuario, aspectos que considera, etc.) como propios del sistema (fracciones, etapas de ciclo de vida, tratamientos, etc.) y de la metodología ACV (etapas, categorías de impacto, métodos de evaluación del impacto, etc.).

Finalmente, se seleccionarán algunas de las herramientas analizadas y se aplican a un mismo caso de estudio, con el fin de determinar cómo influye la herramienta aplicada en los resultados, y poder seleccionar aquélla que mejor se adapte a la realización de estudios de este tipo a nivel nacional.

Figura 2: Comparativa entre los límites del sistema producto y sistema de gestión de residuos.



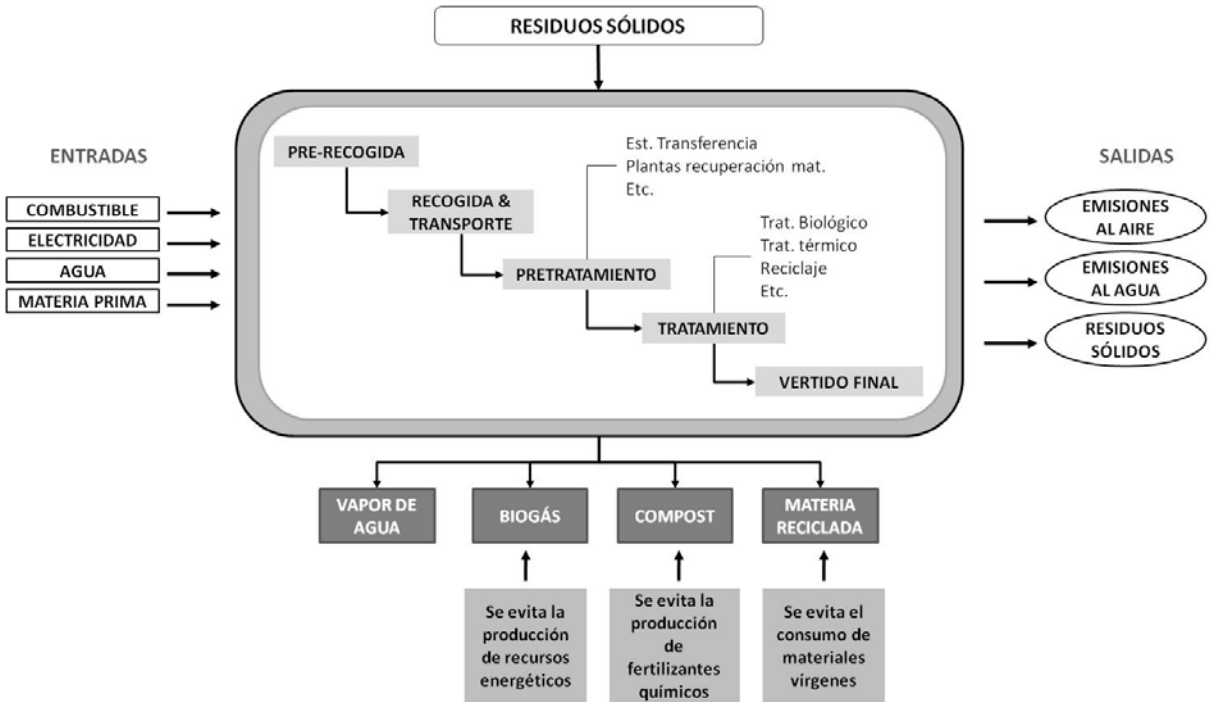
2. ACV aplicado a la evaluación ambiental de sistemas de gestión de residuos

3.1 Etapa I: Definición Objetivos y Alcance

El ***objetivo*** que se persigue al aplicar la metodología ACV al campo de gestión de residuos puede ser muy variad: comparar diferentes escenarios de gestión de residuos, identificar la etapa del ciclo de vida más sensible a una mejora de su comportamiento ambiental, comparar diferentes técnicas o tratamientos aplicables a los residuos (compostaje vs biogasificación, vertido vs incineración, etc.), etc.

Los ***límites del sistema*** determinan qué procesos unitarios se deben incluir dentro del estudio. En el caso de un SGR, los límites del sistema se muestran en la Figura 3.

Figura 3: Límites de un sistema de gestión de residuos.



En esta etapa del estudio de ACV ha de definirse la ***unidad funcional***, que es la unidad a la cual van a ir referenciados todos los datos del estudio. En el caso de un SGR, lo habitual es considerar como unidad funcional la gestión de 1 tonelada de residuos generados en el municipio objeto de estudio o la gestión de la cantidad anual de residuos generados en dicho municipio.

Finalmente, es conveniente incluir alguna referencia a los ***requisitos de calidad de los datos***, que deben ser coherentes con los objetivos y el alcance del estudio de ACV.

3.2 Etapa II: Análisis de Inventario de Ciclo de Vida

La etapa de análisis del inventario implica la recopilación de los datos y los procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas y salidas del sistema objeto de estudio. En el caso de un sistema de gestión de residuos, la etapa de inventario implica recopilar los siguientes datos para cada una de las etapas mostradas en la Figura 3:

- Pre-Recogida: cantidad de bolsas de plástico empleadas para almacenar los residuos, cantidad de contenedores empleados, materiales de fabricación de los mismos, etc.
- Recogida y Transporte: vehículos de recogida empleados, consumos de combustible asociados a los mismos, distancia y tipo de rutas realizadas, etc.
- Pre-Tratamientos: consumos energéticos, de agua, de recursos de todas las plantas de pre-tratamiento presentes en el SGR (estaciones de transferencia, plantas de recuperación de materiales, plantas clasificadoras, etc.).
- Tratamiento: consumos energéticos, de agua, de recursos de todas las plantas de tratamiento presentes en el SGR (plantas de compostaje, biometanización, reciclaje, incineración, etc.) y la carga evitada o material/recurso que deja de utilizarse por el uso sustitutivo de los materiales/recursos producidos (compost, metano, material reciclado o energía de recuperación de calor).
- Disposición final: consumos energéticos, de agua, de recursos asociados al tipo de vertedero empleado y carga evitada si se trata de vertedero con aprovechamiento energético.

3.3 Etapa III: Evaluación del Impacto de Ciclo de Vida

Según la norma ISO 14040-44 (2006), el análisis de impacto puede realizarse a dos niveles:

- con ***elementos obligatorios***, que permiten obtener un indicador para diferentes categorías de impacto (agotamiento de recursos, efecto invernadero, acidificación, eutrofización, etc.).
- con ***elementos opcionales***, que permiten obtener un único indicador que engloba toda la información del inventario mediante la aplicación de un método de evaluación del impacto: Eco-indicator 95 (Goedkoop, 1995), Eco-indicator 99 (Goedkoop y Spriensma, 2000), EPS2000 (Steen, 1999), etc.

3.4 Etapa IV: Interpretación de los resultados

En esta última etapa de un ACV se combina la información obtenida en la fase de inventario y evaluación del impacto para llegar a identificar las variables significativas teniendo en cuenta los análisis de sensibilidad realizados. Los resultados de esta interpretación pueden adquirir la forma de conclusiones y recomendaciones para la toma de decisiones de acuerdo con los objetivos y el alcance del estudio.

4. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS CARACTERÍSTICAS FUNCIONALES DEL *SOFTWARE* SELECCIONADO

Como se ha indicado previamente, en los últimos años se han desarrollado diferentes herramientas informáticas que facilitan la aplicación de la metodología ACV al campo de la gestión de residuos. A continuación se describen brevemente las más utilizadas:

- **IWM-2** (*Integrated Waste Management Version 2*) (McDougall et al, 2004) es un modelo de Inventario de Ciclo de Vida para Gestión Integral de Residuos Urbanos desarrollado por Procter & Gamble, disponible desde 2001. Sus aplicaciones con optimizar el funcionamiento de escenarios de gestión de residuos, así como comparar el rendimiento de diferentes sistemas de gestión de residuos. Su principal objetivo será predecir con la mayor precisión posible las cargas ambientales y los costes económicos de sistemas específicos de gestión de residuos.
- **IWMMM** (*Integrated Waste Management Model for Municipalities*) (Cirko et al, 2000) es un modelo informático de Análisis de Ciclo de Vida aplicado a la gestión de los residuos urbanos desarrollado por la Universidad de Waterloo (Canada), con el apoyo de CSR/EPIC (Corporations Supporting Recycling and the Environmental and Plastics Industry Council), disponible desde 2000. Su principal objetivo es proporcionar a los municipios canadienses una herramienta que les permita evaluar el rendimiento medioambiental de diversos elementos de sus sistemas de gestión de residuos.
- **WARM** (*WAste Reduction Model*) (EPA, 2009) es un modelo informático de Análisis de Ciclo de Vida aplicado a la gestión de los residuos urbanos desarrollado por la Environmental Protection Agency (EPA), disponible desde 2006. Su objetivo es ayudar a los técnicos encargados de la gestión de residuos a detectar e informar sobre las reducciones de emisiones de gases de efecto invernadero que la puesta en práctica de diversos sistemas de gestión de residuos producen.
- **LCA-IWM (***LCA-Integrated Waste Management*) (den Boer et al, 2005) es el resultado de un proyecto de investigación apoyado por la Comisión Europea bajo el Quinto Programa Marco dentro de la temática de Energía, Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Ha sido desarrollado por la Danmarsk Tekniske Universitet y está disponible desde 2005. El principal objetivo del proyecto es desarrollar herramientas que ayuden a la optimización de sistemas de gestión de residuos en ciudades europeas.
- **WISARD** (*Waste Integrated Systems for Assessment of Recovery and Disposal*) (Ecobilan, 1999) es un modelo informático de Análisis de Ciclo de Vida aplicado a la gestión de los residuos urbanos desarrollado por Ecobilan, disponible desde 1999. Su objetivo principal es ayudar a los encargados de la toma de decisiones en materia medioambiental a evaluar escenarios alternativos de gestión de residuos.

La Tabla 2 muestra la comparativa entre las principales características generales de cada uno de las herramientas.

Tabla 2: Características generales.

SOFTWARE	DESARROLLADOR	PAÍS / REGIÓN	DISPONIBILIDAD	FACTORES ECONÓMICOS	FACTORES SOCIALES	FACILIDAD APRENDIZAJE/USO
IWM-2	Procter & Gamble	EE.UU.	Software comercial	✓		Sencillo
IWMMM	University of Waterloo (Canada)	Canada	Software libre			Sencillo
WARM	Environmental Protection Agency	EE.UU.	Software libre			Muy sencillo
LCA-IWM	Darmstadt University of Technology	U.E.	Software libre	✓	✓	Sencillo
WISARD	Ecobilan	EE.UU.	Software comercial	✓		Complicado

Dentro de las características asociadas a la gestión de residuos de cada una de las herramientas comparadas, la Tabla 3 muestra las fracciones de residuos que es posible considerar en cada uno de ellos y las etapas o tratamientos alternativos que es posible aplicar a los mismos.

Tabla 3. Fracciones y etapas/tratamientos de residuos considerados.

	FRACCIÓN												ETAPA/TRATAMIENTO												
Software	Materia orgánica	Papel/Cartón	Vidrio	Envases	Metal férrico	Metal no férrico	Madera	Textil	Jardinería	Voluminosos	RAEE	Resto	Reducción en origen	Pre-Recogida	Recogida	Transporte	Pre-Tratamiento	Compostaje	Digestión anaerobia	Incineración	Pirólisis	Gasificación	Aplicación al terreno	Vertido	Reciclaje
IWM-2	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			<	✓	✓
IWMMM	✓	✓	✓	✓	✓	✓						✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓
WARM	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓		✓	✓			✓		✓		✓				✓	✓
LCA-IWM	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓				✓	✓
WISARD	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓				✓	✓

Comparando el alcance de la metodología ACV en cada uno de ellos, la Tabla 4 muestra las etapas de la metodología que incluye cada herramienta, y las categorías de impacto consideradas en la etapa de evaluación del impacto.

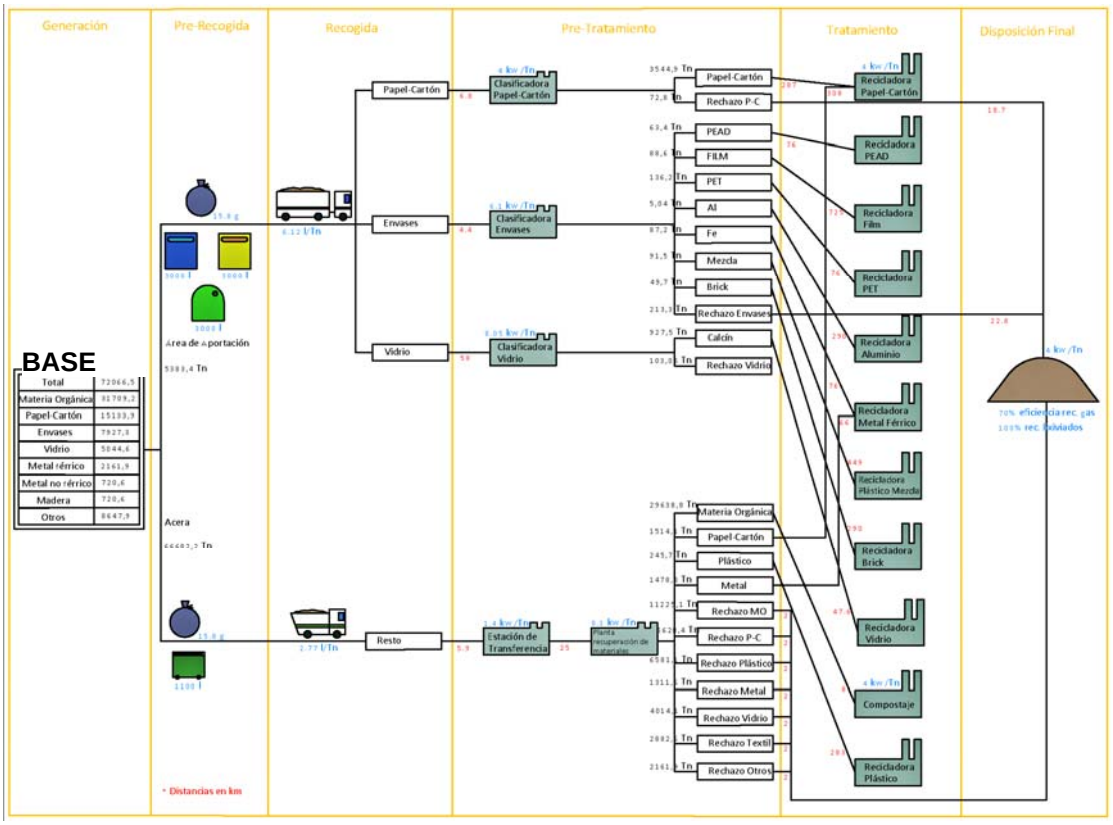
Tabla 4. Etapas de Análisis de Ciclo de Vida

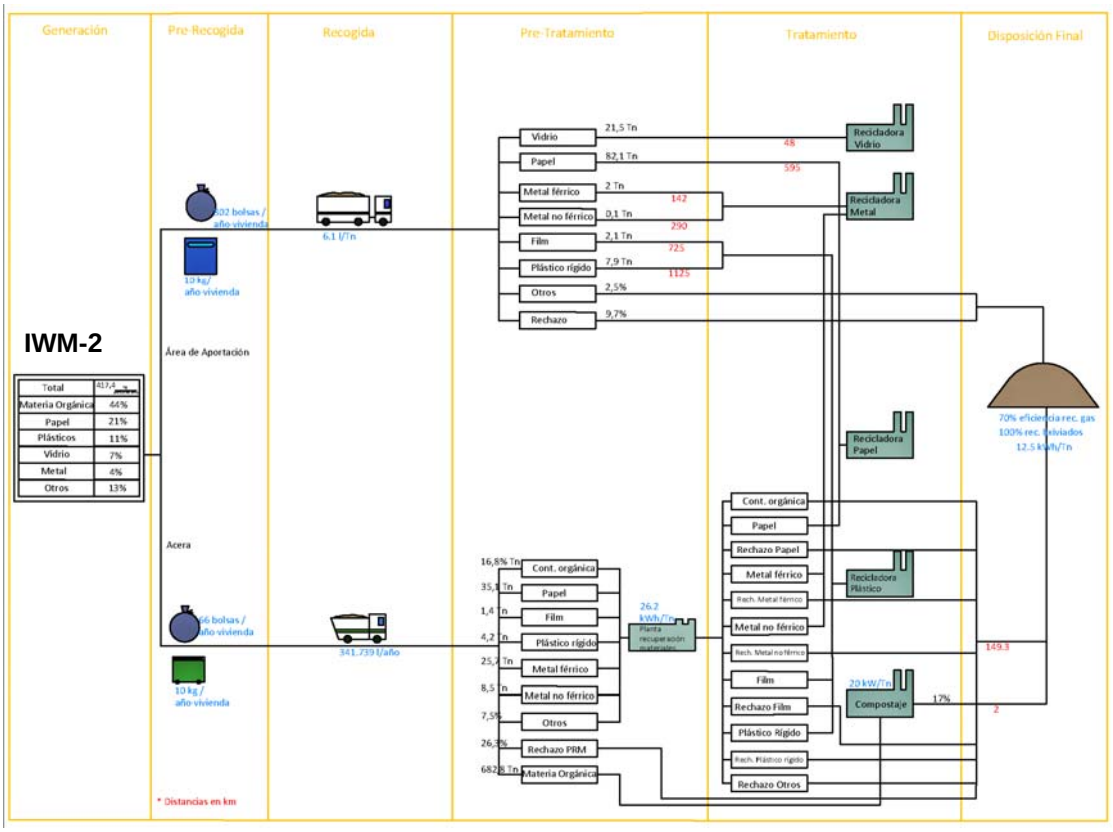
	ETAPAS METODOLOGÍA ACV							EVALUACIÓN IMPACTO						
			Análisis de Impacto de Ciclo de Vida					Categorías de impacto						
Software	Objetivos y alcance	Inventario de Ciclo de Vida	Clasificación	Caracterización	Normalización	Agrupación	Ponderación	Efecto invernadero	Acidifiación	Eutrofización	Smog fotoquímico	Agotamiento biótico	Reducción capa ozono	Toxicidad humana
IWM-2	✓	✓	✓	✓				✓						
IWMMM	✓	✓	✓	✓				✓	✓		✓			✓
WARM	✓	✓	✓	✓				✓						
LCA-IWM	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓
WISARD	✓	✓	✓	✓				✓	✓	✓	✓		✓	✓

6. Caso de aplicación

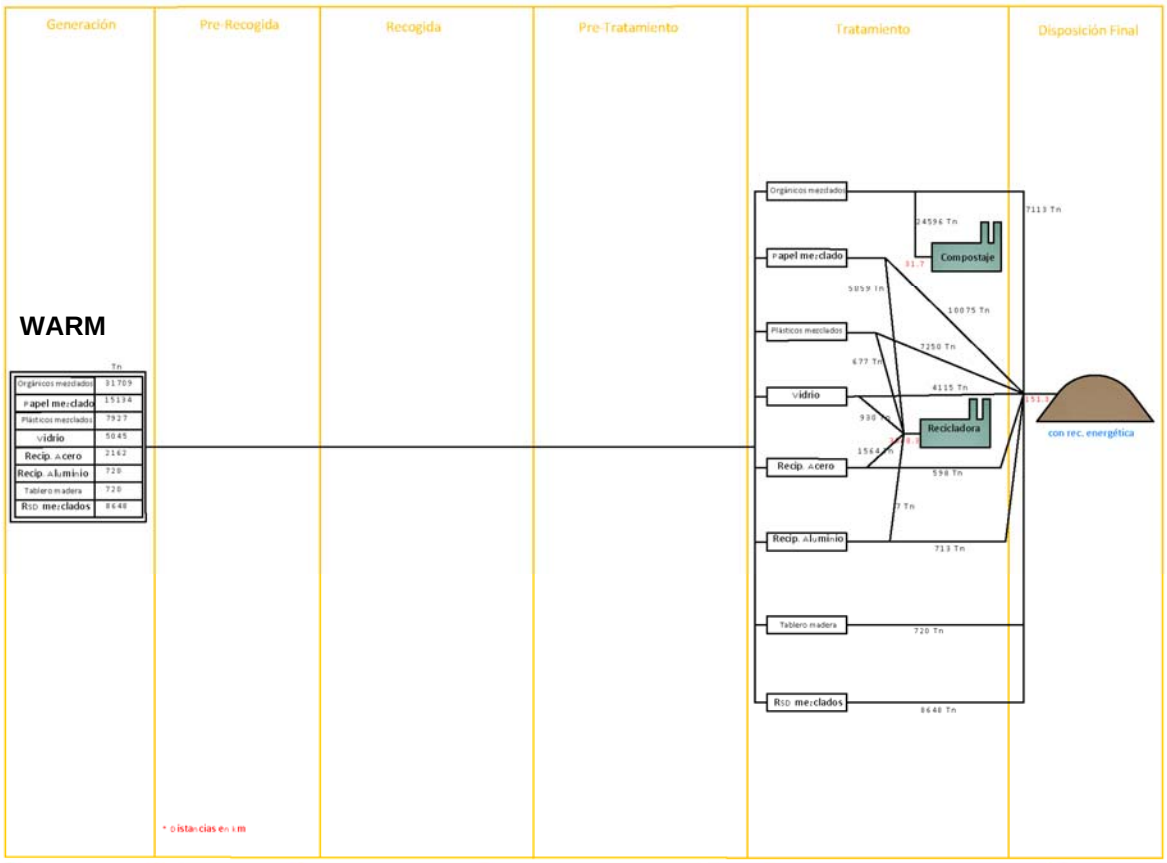
En este apartado se presentan los resultados obtenidos al aplicar las herramientas informáticas descritas anteriormente sobre un mismo escenario base, con el fin de identificar cómo afecta el modelo aplicado a los resultados.

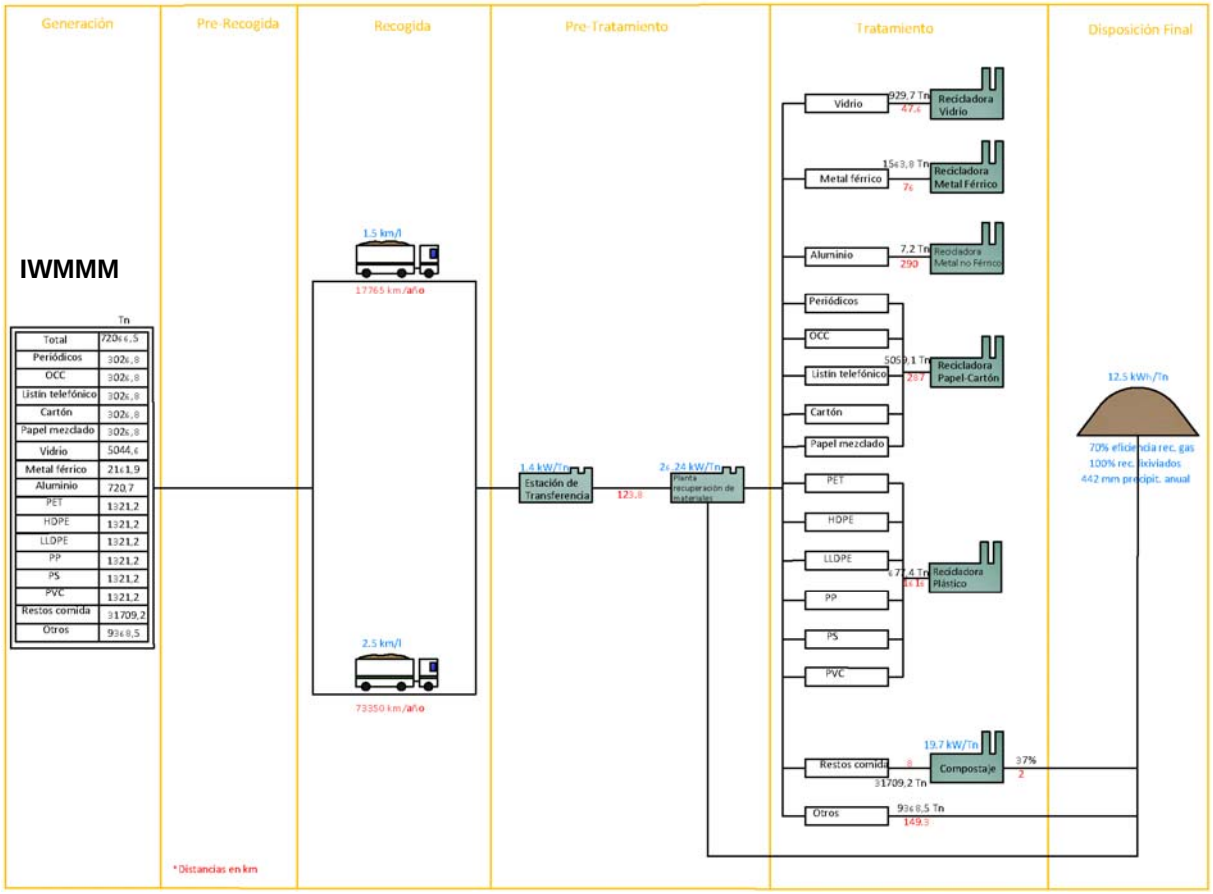
Figura 4. Escenario Base[1].

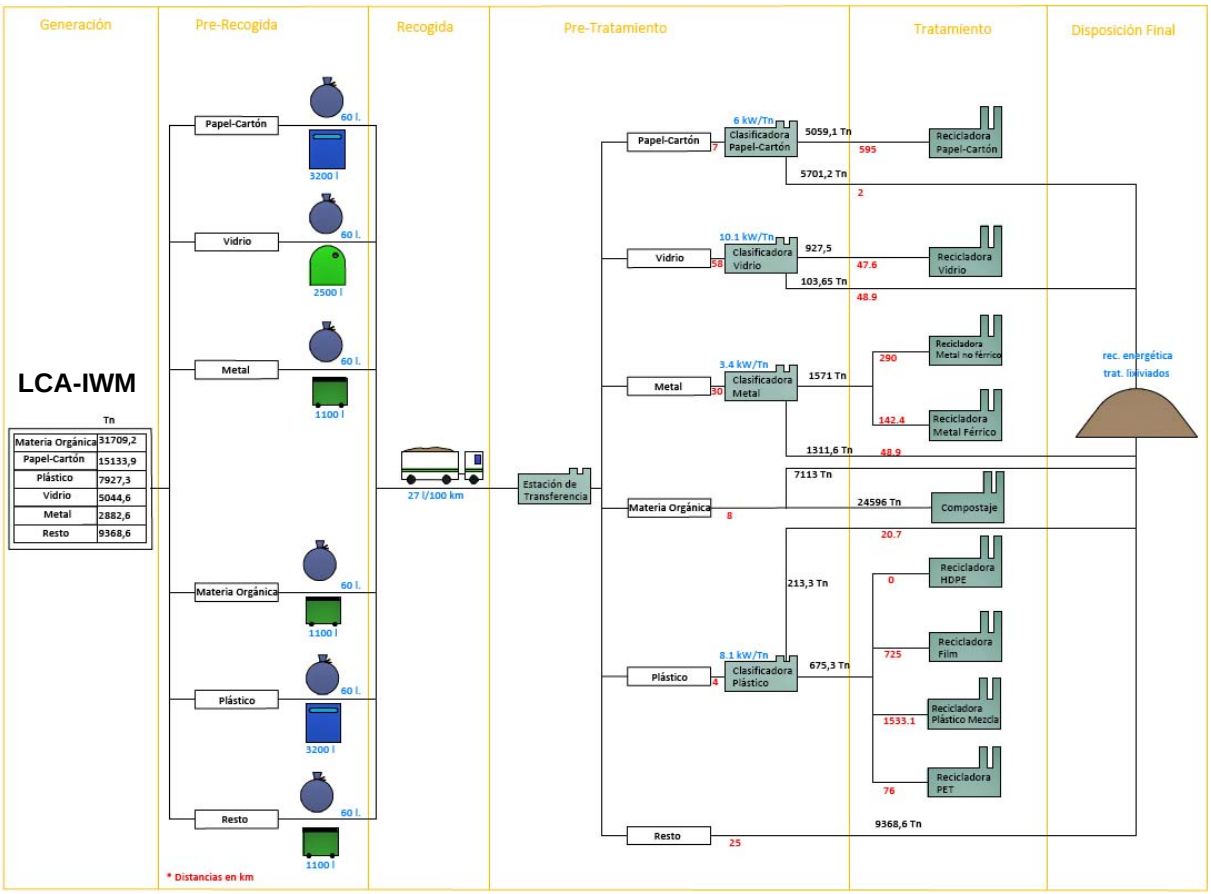


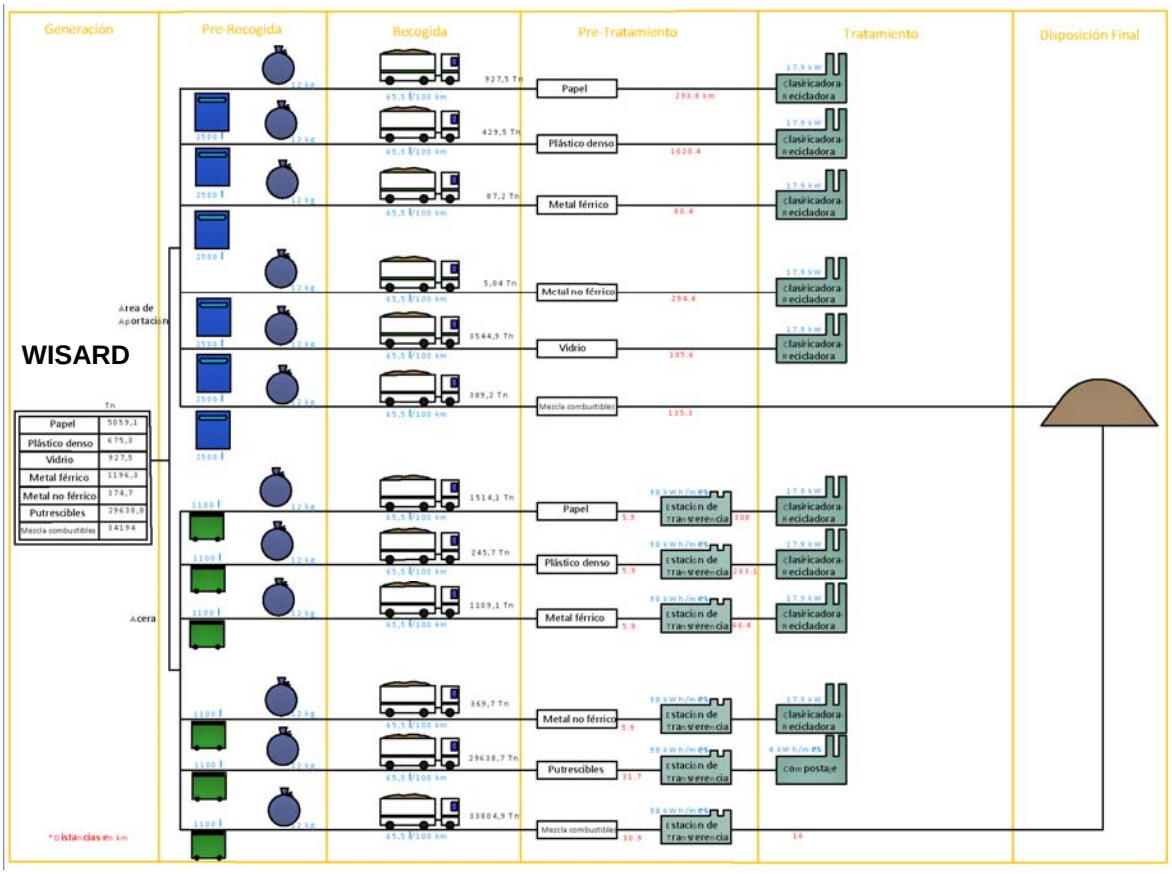


[1] Código de colores en los esquemas: negro: cantidades de los distintos flujos de residuo, azul: consumos de las plantas de Pre-Tratamiento y Tratamiento y capacidad de contenedores y bolsas de basura y rojo: distancias a recorrer por los flujos de residuos entre las distintas etapas.


Generación
Pre-Recogida
Recogida
Pre-Tratamiento
Tratamiento
Disposición Final
WARM
Tn
Orgánicos mezclados 31709
Papel mezclado 15134
Plásticos mezclados 7927
Vidrio 5045
Recip. Acero 2142
Recip. Aluminio 720
Tablero madera 720
RSD mezclados 8648
Orgánicos mezclados
Papel mezclado
Plásticos mezclados
Vidrio
Recip. Acero
Recip. Aluminio
Tablero madera
RSD mezclados
24596 Tn
7113 Tn
Compostaje
5059 Tn
10075 Tn
7250 Tn
677 Tn
4115 Tn
930 Tn
1564 Tn
Recicladora
598 Tn
7 Tn
713 Tn
720 Tn
8648 Tn
con rec. energética
* Distancias en km


Generación
Pre-Recogida
Recogida
Pre-Tratamiento
Tratamiento
Disposición Final
IWMMM
Tn
Total 72046,5
Periódicos 3026,8
OCC 3026,8
Listín telefónico 3026,8
Cartón 3026,8
Papel mezclado 3026,8
Vidrio 5044,6
Metal férrico 2161,9
Aluminio 720,7
PET 1321,2
HDPE 1321,2
LLDPE 1321,2
PP 1321,2
PS 1321,2
PVC 1321,2
Restos comida 31709,2
Otros 9368,5
1,5 km/l
17765 km/año
2,5 km/l
73350 km/año
1,4 kW/Tn
Estación de Transferencia
123,8
24,24 kW/Tn
Planta Recuperación de Materiales
Vidrio
929,7 Tn
47,6
Recicladora Vidrio
Metal férrico
1563,8 Tn
7%
Recicladora Metal Férrico
Aluminio
7,2 Tn
290
Recicladora Metal no Férrico
Periódicos
OCC
Listín telefónico
Cartón
Papel mezclado
5059,1 Tn
287
Recicladora Papel-Cartón
PET
HDPE
LLDPE
PP
PS
PVC
477,4 Tn
Recicladora Plástico
19,7 kW/Tn
Restos comida
31709,2 Tn
Compostaje
97%
2
Otros
9368,5 Tn
149,3
12,5 kWh/Tn
70% eficiencia rec. gas
100% rec. lixiviados
442 mm precipit. anual
* Distancias en km


Generación
Pre-Recogida
Recogida
Pre-Tratamiento
Tratamiento
Disposición Final
LCA-IWM
Tn
Materia Orgánica 31709,2
Papel-Cartón 15133,9
Plástico 7927,3
Vidrio 5044,6
Metal 2882,6
Resto 9368,6
Papel-Cartón
Vidrio
Metal
Materia Orgánica
Plástico
Resto
60 l.
3200 l
2500 l
1100 l
27 l/100 km
Estación de Transferencia
6 kW/Tn
Clasificadora Papel-Cartón
5059,1 Tn
595
5701,2 Tn
2
Reciclador Papel-Cartón
10.1 kW/Tn
Clasificadora Vidrio
927,5
47.6
103,65 Tn
48.9
Reciclador Vidrio
3.4 kW/Tn
Clasificadora Metal
1571 Tn
290
142.4
1311,6 Tn
48.9
Reciclador Metal no férrico
Reciclador Metal Férrico
7113 Tn
24596 Tn
20.7
Compostaje
213,3 Tn
8.1 kW/Tn
Clasificadora Plástico
675,3 Tn
0
725
1533.1
76
Reciclador HDPE
Reciclador Film
Reciclador Plástico Mezcla
Reciclador PET
9368,6 Tn
25
rec. energética
trat. lnviados
* Distancias en km


Generación
Pre-Recogida
Recogida
Pre-Tratamiento
Tratamiento
Disposición Final
WISARD
Tn
Papel 5059,1
Plástico denso 475,3
Vidrio 927,5
Metal férrico 1196,3
Metal no férrico 374,7
Putrescibles 29630,8
Mezcla combustibles 34194
Área de Aportación
Acera
927,5 Tn
429,5 Tn
87,2 Tn
5,04 Tn
3544,3 Tn
389,2 Tn
1514,1 Tn
245,7 Tn
1109,1 Tn
369,7 Tn
29638,7 Tn
33804,9 Tn
Papel
Plástico denso
Metal férrico
Metal no férrico
Vidrio
Mezcla combustibles
Estación de transferencia
clasificadora-recicladora
compostaje
*Distancias en km

6.3 Comparación de resultados

Las diferencias descritas anteriormente entre las herramientas informáticas analizadas complican sobremanera la comparación de los resultados obtenidos para un mismo escenario de gestión de residuos.

Las Figuras 6-8 muestran los resultados comparables obtenidos para diferentes categorías de impacto.

Figura 6. Categoría de Impacto Efecto Invernadero (kg CO_2eq.)

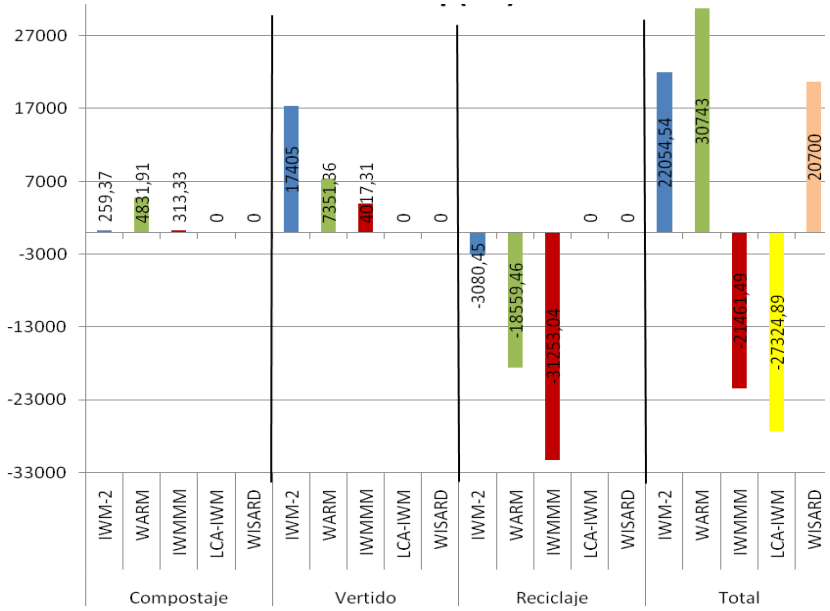
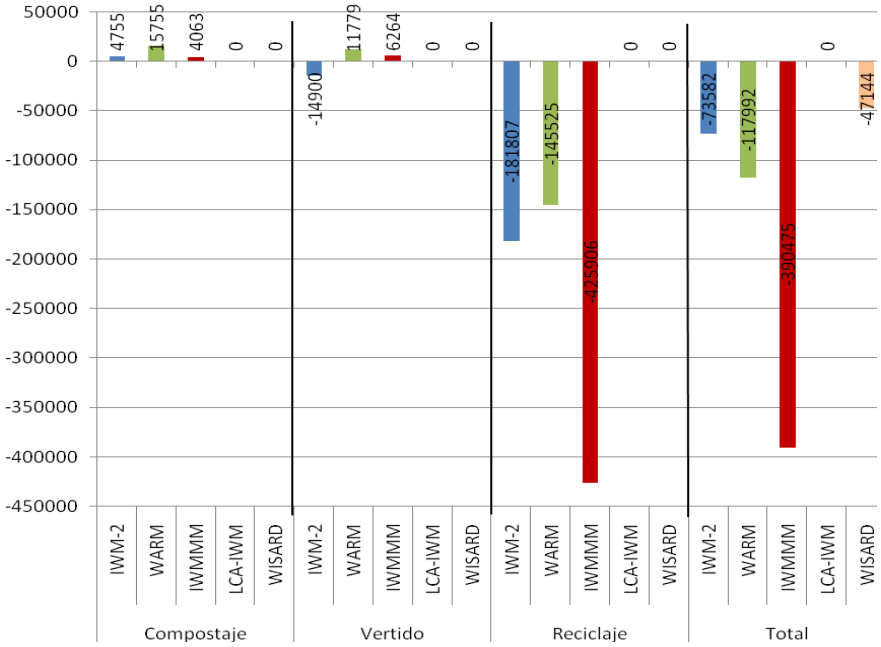
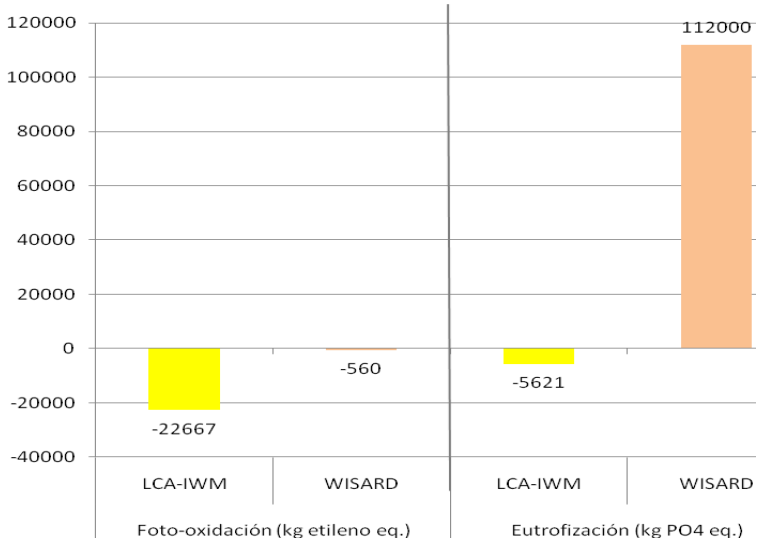


Figura 7. Energía consumida[2].



[2] WISARD no ofrece resultados desglosados en etapas, mientras que LCA-IWM no ofrece valores asociados a consumo energético. Estos valores aparecerán en el gráfico con un valor igual a cero.

Figura 8. Foto-oxidación Química y Eutrofización.



Las mayores diferencias en la categoría efecto invernadero se deben al tratamiento Reciclado, donde se observa que LCA-IWM e IWMMM atribuyen al reciclado una carga evitada mucho mayor que IWM-2, WARM y WISARD. Este hecho se repite en la Figura 7 al comparar la energía consumida.

En el caso de oxidación fotoquímica, su indicador únicamente se calcula en LCA-IWM y WISARD. En ambos la carga evitada ofrece indicadores de valor negativo, si bien LCA-IWM da un valor 40 veces más negativo que WISARD.

Finalmente, destacar las grandes diferencias que también aparecen para la categoría de eutrofización.

7. Discusión y conclusiones

Las conclusiones que se extraen del estudio realizado son:

- Se observa una importante modificación del Escenario Base al introducir los datos de entrada en las distintas herramientas informáticas. Esta modificación causa una importante distorsión del sistema de gestión de residuos estudiado, provocando que los resultados obtenidos no correspondan al escenario base real, sino a un escenario que se le asemeja en mayor o menor medida, en función de la herramienta empleada. Este aspecto está relacionado con la definición del alcance del estudio de ACV.
- Las herramientas analizadas ofrecen al usuario diferentes funcionalidades (fracciones de residuos, tratamientos, etc.), lo cual tiene incidencia sobre la cantidad y tipo de resultados que permiten obtener.
- Se obtienen resultados muy dispares al comparar categorías de impacto calculadas mediante diferentes herramientas, pudiéndose llegar también a conclusiones contradictorias en cuanto al comportamiento ambiental de los sistemas de gestión de residuos. De ahí la necesidad de realizar un análisis exhaustivo de los modelos de inventarios que incorpora cada una de las herramientas informáticas analizadas.

REFERENCIAS

Cirko C., Edgecombe F.H., Gagnon M., Perry G., Haight M.E., Jackson D., Love G., Kelleher M., Massicotte S., Schubert J., South G. & Veiga P. (2000). EPIC/CSR Integrated Solid Waste Management Tools: Project Report. *University of Waterloo, Canada*.

den Boer E., den Boer J., Jager J., Rodrigo J., Meneses M., Castells F. & Schanne L. (2005). The Use of Life Cycle Assessment Tool for the Development of Integrated Waste Management Strategies for Cities and Regions with Rapid Growing Economies LCA-IWM. *Technische Universitaet Darmstadt*.

Ecobilan Group. (1999). Waste Integrated Systems Assessment for Recovery and Disposal. Reference Guide. *ECOBILAN*.

Environmental Protection Agency. (2009). Municipal Solid Waste Generation, Recycling and Disposal in the United States: facts and figures for 2008. *United States EPA*.

Finnveden, G., Hauschild, M., Ekvall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S., Koehler, A., Pennington, D. & Suh, S. (2010). Recent developments in Life Cycle Assessment. Journal of Environmental Management, 91, 1-21.

Goedkoop, M. (1995). The Ecoindicator'95: Final Report. *Pré Consultants BV, Amersfoort: The Netherlands.*

Goedkoop M., Spriensma, R. (2000). The Ecoindicator'99: a Damage Oriented Method for Life Cycle Impact Assessment: Methodology Report. *Pré Consultants BV, Amersfoort: The Netherlands.*

McDougall F., White P., Franke M. & Hindle P. (2004). *Gestión Integral de Residuos: Inventario de Ciclo de Vida, pp 43-63.* Procter & Gamble Industrial.

UNE-EN ISO 14040-44. (2006). Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. *European Committe for Standarization (CEN).*

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universitat Jaume I-Fundació Bancaixa la financiación recibida para la realización de este estudio (Proyecto P1· 1B2008-49).

Correspondencia

María Dolores Bovea Edo. Departamento de Ingeniería Mecánica y Construcción. Universitat Jaume I. Castellón. España.
Tel.: 964 72 81 12
Fax: 964 72 81 06
E-mail: bovea@emc.uji.es