



ESTACIÓN EXPERIMENTAL
AGROINDUSTRIAL
OBISPO COLOMBRES
Tucumán | Argentina



El análisis de ciclo de vida: de la cuna a la tumba





El análisis de ciclo de vida: de la cuna a la tumba

L. Patricia Garolera De Nucci* y Gerónimo J. Cárdenas**

* Ing. Qca., Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales, EEAOC. pgarolera@eeaac.org.ar

** Ing. Qco., Programa Bioenergía, EEAOC.

Vivimos en un mundo donde el modelo de desarrollo de la sociedad tiene efectos negativos sobre el planeta: la disminución de la capa de ozono, la producción de lluvia ácida, la emisión de altos niveles de dióxido de carbono a la atmósfera y el calentamiento global, entre otros. Se trata de impactos ambientales que son tema central de las noticias y nuestras conversaciones, y cada vez son más las acciones dirigidas a evitarlos.

En la actualidad, existen numerosas metodologías que permiten conocer y cuantificar la repercusión de cualquier sistema sobre el medio ambiente. Una de las más destacadas y frecuentes en nuestro país es el análisis de ciclo de vida (ACV), también conocido como “life cycle assessment” (LCA) en la literatura anglosajona.

El ACV es una herramienta de gestión ambiental que permite determinar, a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto, proceso o actividad, los impactos ambientales generados por el desarrollo, la producción y el uso final de ese producto, proceso o actividad. Este tipo de análisis también suele llamarse “de la cuna a la tumba”, ya que considera toda la “historia” del producto.

El ACV se realiza según los procedimientos estipulados en la sub-serie de normas ISO 14040, de las cuales ya se han emitido en nuestro país las IRAM-ISO 14040, 14041, 14042 y 14043, estando otras en etapa de estudio, como

ser las correspondientes a huella de carbono y huella del agua.

Análisis de ciclo de vida: su concepto

El análisis de ciclo de vida (ACV) es una metodología para evaluar todos los impactos ambientales asociados con un producto, proceso o actividad, a fin de identificar, cuantificar y evaluar todos los recursos consumidos y todas las emisiones y desechos liberados al medio ambiente.

Según la Society for Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) la evaluación se realiza sobre la base del ciclo de vida completo del proceso o actividad, incluyendo la extracción y el tratamiento de la materia prima, su industrialización, transporte, distribución, uso, reciclado, reutilización y disposición final.

En la Figura 1 se muestra el concepto de un ACV y las etapas que se tienen en cuenta.

Este análisis se realiza mediante el registro de las entradas y salidas de un sistema en un inventario, la evaluación de los impactos ambientales potenciales asociados a ellas y la interpretación de los resultados de las fases de análisis de inventario y de evaluación del impacto, en relación con los objetivos del estudio (IRAM, 2008).

El objetivo de esta metodología es mostrar que un producto, ya sea un material procesado, servicio, actividad o proceso, no solo impacta

en el medio ambiente al ser usado, sino también al ser fabricado y desechado.

Las aplicaciones de esta herramienta tienen diferentes propósitos, entre los que se destacan la identificación de áreas susceptibles de mejoras en un proceso, la obtención del perfil ambiental de un producto y la comparación entre productos y procesos.

Metodología

El análisis de ciclo de vida comprende cuatro etapas o fases, relacionadas entre sí:

1. Definición del objetivo y alcance del estudio.
2. Análisis de inventario del ciclo de vida (AICV).
3. Evaluación de impacto del ciclo de vida (EICV).
4. Interpretación.

El **objetivo** y el **alcance** de un ACV establecen la finalidad del estudio, las hipótesis, los datos necesarios y los límites del análisis, para determinar con qué propósito se utilizarán las conclusiones y los resultados obtenidos. Es importante definir, en esta fase, la unidad funcional que provee una referencia con la cual las entradas y salidas están relacionadas, y que debe ser coherente con el objetivo y alcance del estudio. También deben establecerse los límites del sistema que definen los procesos y operaciones a considerarse dentro y fuera de él.

El **análisis de inventario del ciclo**

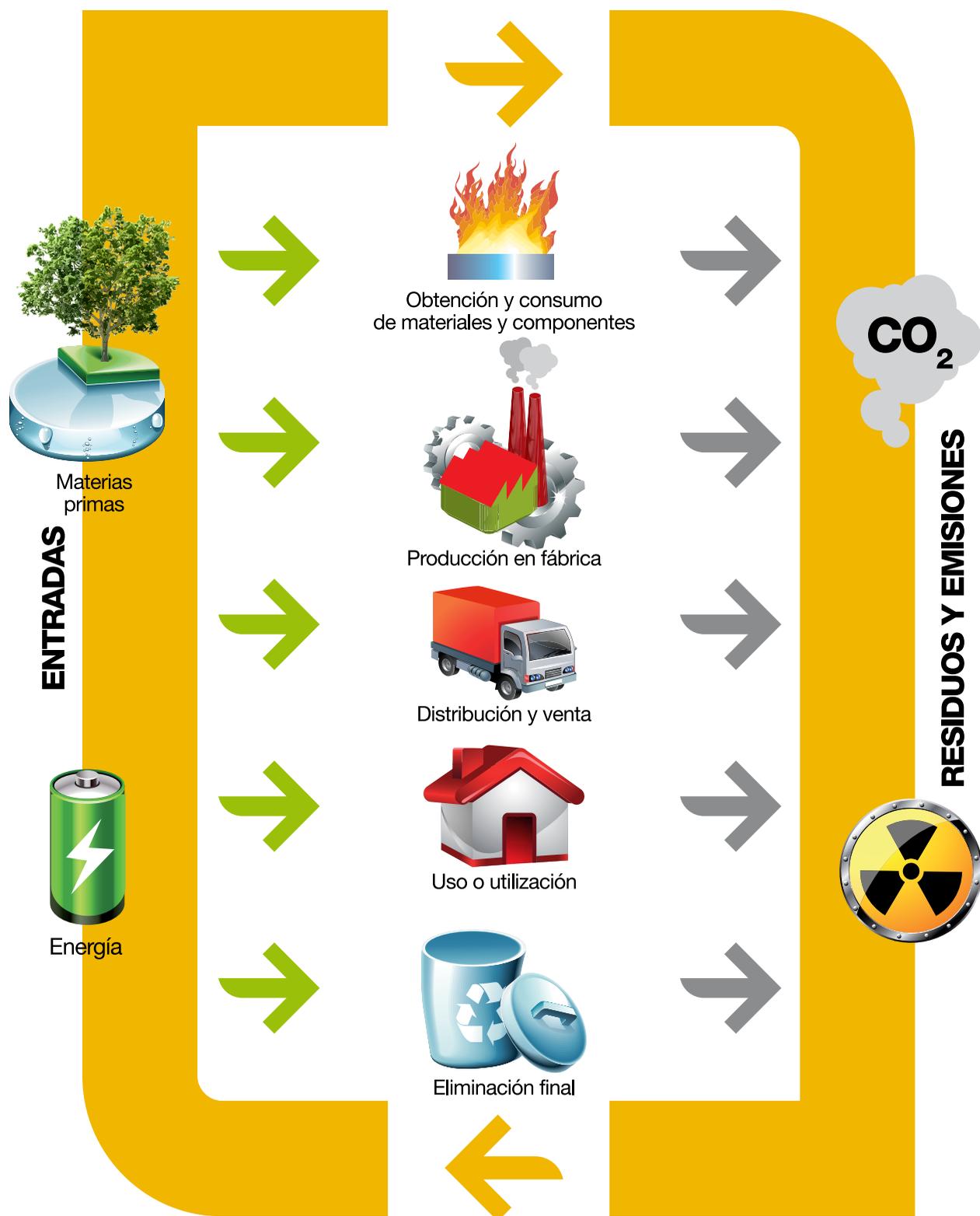


Figura 1. Concepto de la perspectiva de un análisis de ciclo de vida (ACV) y etapas que se tienen en cuenta.
Fuente: adaptado de Ihobe S.A. (2009).

de vida implica la recopilación de los datos necesarios para cumplir los objetivos del estudio definido. En esta segunda fase, se compilan y cuantifican en una tabla las entradas y salidas de materiales y/o energía del sistema, en todo su ciclo de vida: insumos, materias primas, emisiones al aire, agua y suelo, productos y subproductos, entre otros.

Los pasos para llevar a cabo la fase del inventario son (!):

- Construcción del diagrama de flujo (sistema, subsistemas, procesos unitarios).
- Establecimiento de la calidad de los datos.
- Definición de los límites del sistema.
- Recolección de datos.
- Redefinición de objetivos y alcance.

Los datos necesarios para generar un inventario generalmente se obtienen de bases de datos, o constituyen datos reales (cuando estos están disponibles). Existe un referente mundial en el desarrollo

de datos de inventarios de ciclo de vida, el Ecoinvent Centre (Swiss Centre for Life Cycle Assessment), que ha generado una extensa base de datos para este análisis, que contiene datos industriales internacionales de inventarios para el suministro energético, la extracción de recursos, el suministro de materiales, productos químicos y metales, la agricultura y los servicios de gestión de residuos y de transporte.

En cuanto a la fase **evaluación de impacto**, su finalidad es clasificar y evaluar los resultados del inventario, analizando cuáles son los impactos que los flujos inventariados producen en el ambiente.

Para llevar a cabo la fase de EICV, primero deben seleccionarse categorías de impactos (tales como calentamiento global, acidificación, eutrofización, etc.), a las cuales deben asignarse los resultados del inventario. Por ejemplo el CO₂ y el CH₄ se pueden asignar a la categoría calentamiento global, mientras que el SO₂ y el NH₃ a la

categoría acidificación. Luego, los valores de estas cargas ambientales se deben multiplicar por factores de caracterización, que surgen de un modelo físico-químico-matemático del impacto de un flujo con respecto a una categoría particular (como ser el modelo del Intergovernmental Panel on Climate Change –IPCC– para cambio climático) y que reflejan la contribución relativa de un valor del inventario a una categoría de impacto; este resultado es el indicador de categoría. Un indicador de categoría es la representación cuantificable de una categoría de impacto de EICV (IRAM, 2000): por ejemplo, energía irradiada en el infrarrojo que corresponde a la categoría calentamiento global y liberación de protones que se atribuye a la acidificación, entre otras.

La Figura 2 esquematiza el concepto de indicadores de categoría.

Una vez calculados los indicadores de categorías, se necesita normalizar los resultados, ya que los distintos efectos ambientales presentan unidades de medida distintas. Es

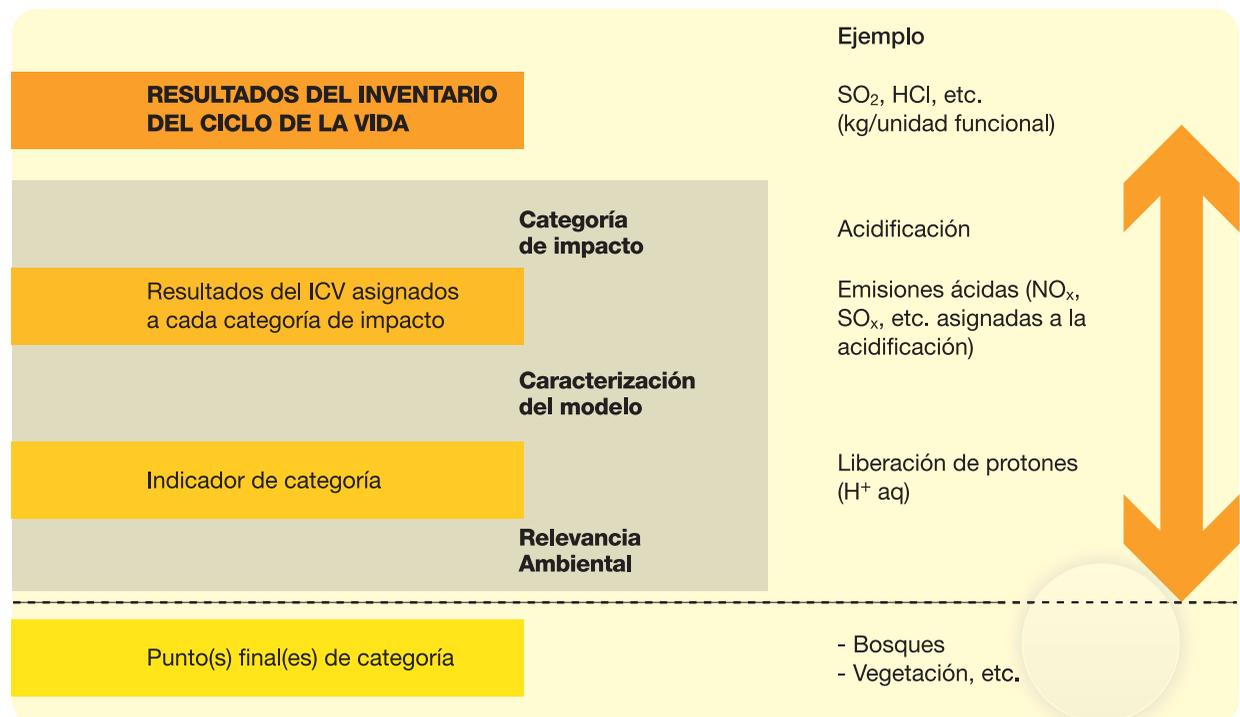


Figura 2. Concepto de indicadores de categorías. / ICV: inventario de ciclo de vida. / Fuente: IRAM-ISO 14042, 2000.

¹ Arena, P. A. 2013. Comunicación personal. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza.



decir, no se puede comparar la emisión de millones de toneladas de CO₂ equivalentes, que contribuyen al calentamiento global, con la emisión de centenares de kilos de hidrocarburos aromáticos policíclicos con efectos cancerígenos. Debe obtenerse, para cada proceso estudiado, un perfil sintético apto para ser confrontado con otros perfiles ⁽²⁾. Esto se logra aplicando un factor de normalización (que existe para cada tipo de impacto) a las cantidades resultantes de cada categoría. Este se calcula a partir del volumen preexistente en el medio ambiente de cada uno de los compuestos contaminantes de referencia, exceptuando la cantidad aportada por el proceso evaluado. Una vez que los impactos fueron normalizados, se obtiene el perfil ambiental del proceso productivo.

Una lista posible de las categorías de impacto a considerar en cualquier estudio de ACV es la siguiente ⁽³⁾:

1. Consumo de recursos:
 - a) recursos abióticos;
 - b) recursos bióticos;
 - c) uso de la tierra.
2. Calentamiento global.
3. Disminución del espesor de la capa del ozono estratosférico.
4. Toxicidad:
 - a) impacto ecotoxicológico;
 - b) impacto toxicológico humano.
5. Formación de oxidantes fotoquímicos ("smog" fotoquímico).
- 6) Acidificación.

7. Eutrofización.
8. Ambiente de trabajo.

Los factores de caracterización son extraídos de bases de datos, tales como CML (por sus siglas en holandés Centrum voor Milieuwetenschappen Leiden), que ya fueron calculados en base a los principios fisicoquímicos subyacentes a cada una de las categorías de impacto. En el caso del calentamiento global, el factor de caracterización es el GWP (del inglés "global warming potential") de cada gas de efecto invernadero (1 para el CO₂, 21 para el CH₄, etc.), expresado en kg CO₂ equivalente/kg emisión (Garolera De Nucci y Cárdenas, 2012). También hay índices de contaminación del agua y del aire, que indican la toxicidad relativa o los efectos sobre la salud de distintos contaminantes, e índices que miden el efecto ecológico de la extracción de recursos naturales.

Entre los métodos que evalúan el impacto ambiental, se encuentra el Eco-indicador 99, que consiste en un número que indica el impacto ambiental de todo el proceso o del producto. Esta metodología cumple con los requisitos de la norma ISO 14042 para calcular valores estándar, aunque puede diferir en algunos detalles. Los valores estándar de los Eco-indicadores se pueden considerar como cifras sin dimensión. Como base, se utiliza el **punto Eco-indicador (Pt)**, aunque normalmente se emplea la unidad de milipuntos (mPts). La escala fue elegida de tal manera que 1 Pt represente una centésima parte de la carga ambiental anual de un ciudadano europeo medio. En comparaciones de procesos o productos, cuanto mayor es el indicador, mayor es el impacto ambiental (Goedkoop and Spriensma, 2001). La metodología consiste en evaluar los daños producidos por las categorías de impacto antes mencionadas:

1. A la salud humana: cambio climático, disminución de la capa de ozono, efectos cancerígenos y respiratorios y radiación ionizante.
2. A la calidad del medio ambiente: acidificación, eutrofización, ecotoxicidad y el uso del suelo.
3. A los recursos: extracción de minerales y combustibles fósiles.

Para calcular los Eco-indicadores, se necesita tener el inventario de las emisiones relevantes, la extracción de



^{2 y 3} Arena, P. A. 2013. Comunicación personal. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza.

recursos y el uso del suelo, además del cálculo de los daños que pueden causar esos flujos y la ponderación de las tres categorías de daños.

Cabe mencionar también el método CML 2001, elaborado por el Centro para Estudios Medioambientales de la Universidad de Leiden, Holanda. Las categorías de impacto incluidas en este método son las usadas en muchos estudios de ACV. En este método, el paso de normalización es opcional para ACV simplificados, pero obligatorio para ACV exhaustivos. Dispone de valores de referencia para la normalización de los indicadores de las categorías de impacto.

Otro método es ReCiPe, que se desarrolló para combinar las ventajas de los métodos CML 2001 y Eco-indicator 99. La ventaja del método CML es su solidez científica, mientras que la ventaja del Eco-indicator 99 es su facilidad de interpretación. Con ello, se han mejorado los modelos para el cambio climático, la destrucción de la capa de ozono, la acidificación, la eutrofización, el uso del suelo y el agotamiento de los recursos naturales. A su vez, se han actualizado factores

de caracterización para algunas categorías de impacto y para el paso de normalización (Ihobe S.A., 2009).

La fase de **interpretación** de resultados es la fase final y combina los resultados del inventario y la evaluación de impacto, para analizarlos de manera conjunta y congruente con los objetivos definidos para el estudio, a fin de establecer conclusiones y recomendaciones para la toma de decisiones. Permite determinar en qué fase del ciclo de vida del producto se generan las principales cargas ambientales, identificándose así los puntos del sistema que pueden o deben mejorarse.

Esta metodología es de carácter iterativo y dinámico y las cuatro fases están relacionadas entre sí, como se esquematiza en la Figura 3.

Herramienta informática

Durante todo el análisis del ciclo de vida, a medida que se obtienen resultados, se pueden modificar o mejorar los datos, las hipótesis, los límites del sistema o los objetivos, lo cual exige el recálculo. Este hecho, más la gran cantidad de datos que se deben poseer para realizar un

ACV, muestra la necesidad de contar con un instrumento informático.

Existen diversas herramientas informáticas comerciales, tales como SimaPro de la empresa holandesa PRé Consultants, Gabi de PE Internacional y Humberto de la empresa Ifu Hamburg, entre otras, todas europeas y destacadas en la industria.

SimaPro es la herramienta más difundida a nivel mundial y sus datos están estructurados de acuerdo a la norma ISO 14040. En la actualidad, la Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC) posee la licencia para utilizar esta herramienta.

El programa permite gestionar el ACV mediante la utilización de bases de datos, creadas por el propio usuario o bibliográficas; entre estas últimas, se destaca EcoInvent, la más completa. Las bases de datos de SimaPro contienen librerías, proyectos y datos generales (nombres de las sustancias, unidades, cantidades, tipos de residuo y referencias bibliográficas).

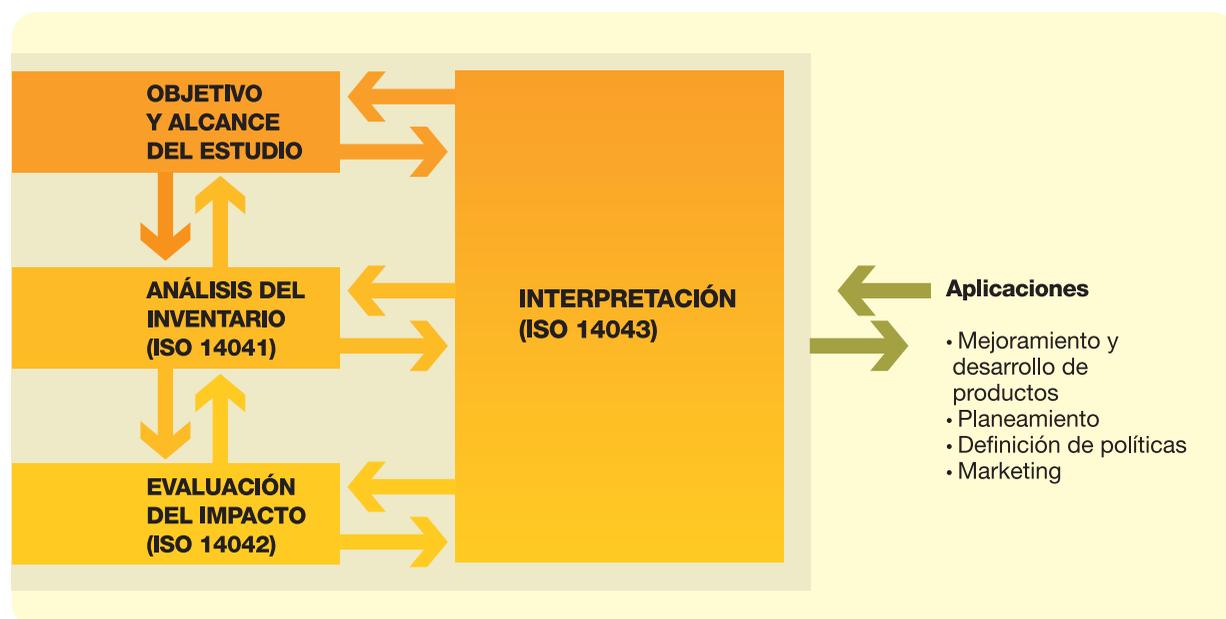


Figura 3. Etapas de un ACV.
Fuente: Cárdenas y Garolera De Nucci, 2012.

Tabla 1. Resumen de las principales bases de datos de SimaPro.

Fuente: Bolea García, 2011.

Nombre	Contenido	Procesos
BUWAL 250 (Suiza, 2001)	Materiales, energía, transporte y residuos generales, basados en la base de datos ETH pero sin bienes de capital (camiones, maquinaria).	286
ETH-ESU 96 (Suiza, 2003)	Muchos procesos importantes de bases de datos de energía y transporte, incluyendo los bienes. Aproximación para la situación europea media.	1.184
Idemat (Univ. Delft. Holanda, 2001)	Base de datos holandesa, recopilada de diferentes fuentes.	507
Industry data (Varios, 2007)	Datos publicados por asociaciones de industriales como APME y PWMI.	74
EcolInvent (Suiza, 2006)	Datos de productos y servicios recogidos por instituciones y consultores suizos, válidos para Europa Occidental.	2.652
DK Input/Output 99 (2005)	Base de datos danesa, principalmente datos de productos producidos o utilizados en Dinamarca.	793
LCA food DK (Dinamarca, 2006)	Datos del sector consumo (agricultura, ganadería, pesca) en Dinamarca.	671
Methods (Varios)	Métodos de evaluación de impacto de diferentes fuentes.	22

ETH: Eidgenössische Technische Hochschule. En español: Escuela Politécnica Federal de Zúrich.
 APME: Association of Plastics Manufacturers.
 PWMI: Plastic Waste Management Institute.

La Tabla 1 muestra las principales bases de datos que contiene el programa.

SimaPro también incluye diversos métodos de evaluación de impacto: Eco-indicator 99, CML 2001, ReCiPe, Traci y IPCC 2007, entre otros.

Entre sus aplicaciones, se destacan el cálculo de la huella de carbono, el diseño de producto y eco-diseño, el impacto ambiental de productos y servicios, los informes ambientales y la determinación de indicadores de desempeño. Posee

una variedad de bases de datos de inventarios y métodos de evaluación de impacto entre los que es posible seleccionar los más convenientes, y se pueden realizar análisis de puntos débiles de un proceso o producto, identificando puntos críticos en su ciclo de vida mediante un árbol de proceso, elaborado por el propio “software” en función de los datos ingresados por el usuario. También realiza el análisis de Monte Carlo de incertidumbre de datos y análisis de escenarios complejos de tratamiento y reciclado de residuos (PRé Consultants, 1990).

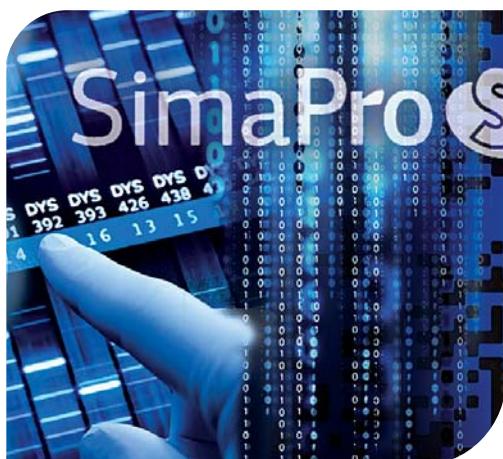
El ACV y los biocombustibles

Teniendo en cuenta las diversas aplicaciones del ACV, es de sumo interés hoy en día estudiar el ciclo de vida de los biocombustibles.

En Tucumán, una de las principales actividades agroindustriales es la cadena de la producción de caña de azúcar, azúcar y bioetanol a partir de ella. La cadena incluye la obtención de la caña de azúcar, su transporte hasta los ingenios, su conversión en un producto final, su posterior distribución y su comercialización. Durante sus diferentes etapas, esta

cadena tiene distintos impactos ambientales, tales como el causado por el uso de combustibles derivados del petróleo, por lo que existe una contribución a las emisiones gaseosas. Por ejemplo, en las tareas de producción agrícola y de transporte se utiliza combustible diésel en maquinarias agrícolas y camiones. El uso de agroquímicos también produce efectos en el medio ambiente, mientras que las calderas (etapa industrial) emiten una considerable cantidad de gases generalmente de efecto invernadero, siendo el CO₂ el de mayor concentración, además de producir material particulado. Sin embargo, el CO₂ emitido es el que el cultivo de la caña de azúcar absorbe durante su crecimiento, cerrándose este ciclo en la producción agroindustrial, por lo que dicho gas no contribuye al calentamiento global.

En ese trabajo, se analiza todo el ciclo de producción simultánea de azúcar y alcohol, desde la etapa agrícola hasta la industrial y bajo las condiciones productivas de la provincia de Tucumán; vale decir que se utiliza información disponible acerca de las tecnologías aplicadas





en el campo y en los ingenios de la provincia. La herramienta informática utilizada en el estudio es el "software" SimaPro v.7.3.3.

Este estudio es un análisis "de la cuna hasta la puerta" también llamado "from cradle to gate", pues comprende las etapas desde el cultivo de la caña de azúcar hasta la obtención de azúcar y alcohol como productos finales. Es decir que se trata de un análisis preliminar de las consecuencias ambientales de la cadena agroindustrial, ya que solo para estas dos etapas se dispone de una mayor cantidad de datos.

En cambio, para determinar el impacto ambiental de la producción de bioetanol, es necesario confeccionar el diagrama de este proceso de producción, identificar y

analizar la carga ambiental a lo largo de su ciclo de vida completo, considerando, además de la fase agrícola e industrial, el transporte y uso energético del biocombustible. Este sería, entonces, un análisis de la cuna a la tumba.

La premisa del estudio es optimizar el proceso de producción de bioetanol desde un punto de vista ambiental, asegurar un desarrollo sostenible del sistema y hacerlo más eficiente. Además, existe potencial para aumentar la energía del proceso, la cual puede generarse a partir de subproductos y el residuo agrícola de cosecha (RAC) e instalando calderas y turbinas más eficientes, con lo que se reduciría aun más la demanda de energía fósil y se obtendrían excedentes de electricidad para vender a la red.



Con la mejora y el desarrollo de tecnologías también se potencia la rentabilidad económica, lo que llevaría a minimizar los impactos negativos para el medio ambiente.

Bibliografía citada

Bolea García, M. 2011. Análisis de dos metodologías de cálculo de la huella de carbono para un sistema de trigeneración optimizado. [En línea]. Disponible <http://zaguan.unizar.es/TAZ-CPS/2011/6049/TAZ-TFM-2011-017.pdf> (consultado 9 mayo 2013).

Cárdenas, G. J. y L. P. Garolera De Nucci. 2012. Sostenibilidad en la producción de biocombustibles. *Avance Agroind.* 33 (2): 39-43.

Garolera De Nucci, L. P. y G. J. Cárdenas. 2012. El cambio climático y los biocombustibles. *Avance Agroind.* 33 (4): 25-30.

Goedkoop, M. and R. Spriensma. 2001. The Eco-indicator 99. A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment. *Methodology Report*. [En línea]. Disponible en http://www.pre-sustainability.com/download/misc/EI99_methodology_v3.pdf (consultado 7 mayo 2013).

Ihobe SA. 2009. Análisis de ciclo de vida y huella de carbono. Dos maneras de medir el impacto ambiental de un producto. [En línea]. Disponible en <http://www.ihobe.net/Publicaciones/> (consultado 7 mayo 2013).

Instituto Argentino de Normalización (IRAM). 2000. IRAM-ISO 14042. Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Evaluación del impacto del ciclo de vida. [En línea]. Disponible en <http://www.iram.org.ar/> (consultado 6 mayo 2013).

Instituto Argentino de Normalización (IRAM). 2008. IRAM-ISO 14040. Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco. IRAM, Buenos Aires, R. Argentina.

PRé Consultants. 1990. About SimaPro. [En línea]. Disponible en <http://www.pre-sustainability.com/simapro-lca-software> (consultado 2 mayo 2013).]