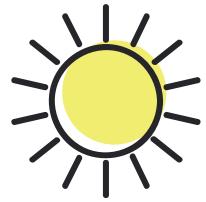


# Manual de implementación de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida en la construcción





## AUTORIDADES NACIONALES

- ▶ Presidente de la Nación

**Mauricio Macri**

- ▶ Secretario General de Presidencia

**Fernando de Andreis**

- ▶ Secretario de Gobierno de Ambiente y Desarrollo

Sustentable

**Rabino Sergio Bergman**

- ▶

Titular de la Unidad de Coordinación General

**Patricia Holzman**

- ▶

Secretario de Cambio Climático y Desarrollo Sustentable

**Carlos Bruno Gentile**

- ▶

Directora Nacional de Evaluación Ambiental

**María Celeste Piñera**

- ▶

Director de Innovación para el Desarrollo Sustentable

**Prem Demián Zalzman**

## EQUIPO DE TRABAJO

Secretaría de Gobierno de Ambiente y Desarrollo Sustentable

**Hernán Roitman**

**Hernán Baulo D.**

**Javier Finkelstein**

Equipo consultor

**Alejandro Pablo Arena**

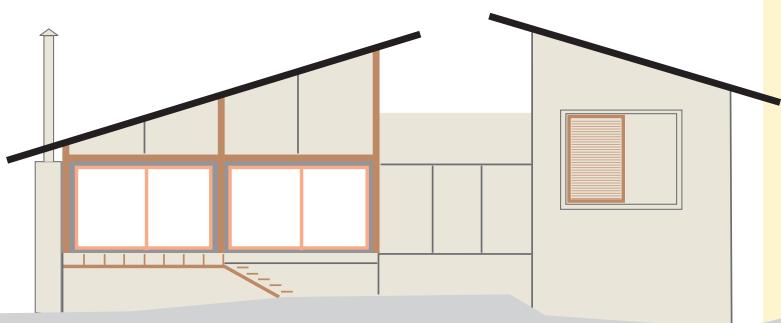
**Roxana Piastrellini**

**Silvia Curadelli**

**Paula Rodriguez**

**Fernando Arce**

Este manual fue impulsado por la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación en el Marco del Proyecto GEF AR-G 1002 " Eficiencia Energética y Energías Renovables en la Vivienda Social Argentina" y contó con el apoyo financiero del Banco Interamericano de Desarrollo que posibilitó la contratación de la Fundación Consultora Ciencia y Tecnología al servicio de la comunidad (CRICYT), una Fundación constituida por miembros del Centro Científico Tecnológico - CONICET-Mendoza - Argentina



# CONTENIDO

Contenido	1
Abreviaturas y acrónimos	6
Introducción	7
Estructura del manual	9

## **Parte I**

Método del análisis de ciclo de vida	9
1. ¿Para qué sirve un análisis de ciclo de vida?	9
1.1. Ejemplos de aplicaciones	10
2. ¿Cómo se inicia un análisis de ciclo de vida?	11
3. ¿Qué aplicaciones tiene un análisis de ciclo de vida?	12
4. ¿Qué puede ocurrir tras realizar un análisis de ciclo de vida?	12
5. ¿Qué normas internacionales se aplican?	12
6. ¿Qué publicaciones existen sobre la temática?	13
7. ¿Cómo se define el método del análisis de ciclo de vida?	13
8. ¿Cómo se realiza un análisis de ciclo de vida?	14
9. ¿Cómo se puede simplificar la realización de un Análisis de ciclo de vida?	15
10. Descripción de las fases para realizar un Análisis de ciclo de vida	16
10.1. Fase 1: Definición de objetivos y alcance	19
10.2. Fase 2: El inventario de Ciclo de Vida	21
10.3. Fase 3: La Evaluación del Impacto de Ciclo de Vida	28
10.4. fase 4: Evaluación e interpretación	41
11. El Análisis de Ciclo de Vida y las huellas como herramientas de gestión y comunicación ambiental	41

# CONTENIDO



## Parte II

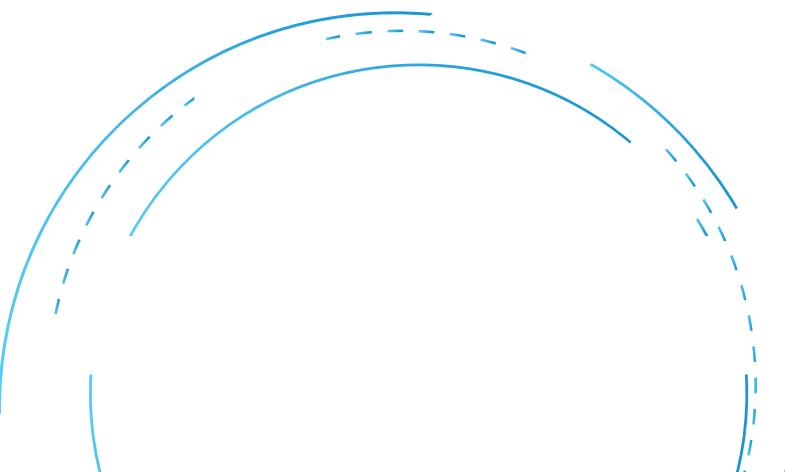
Aplicación del análisis de ciclo de vida a materiales y estrategias de construcción de edificios	42
12. El Análisis de Ciclo de Vida en el sector de la construcción	42
13. Áreas problemáticas encontradas para la realización del Análisis de Ciclo de Vida para las viviendas de interés social	43
14. ¿Cómo adaptar y aplicar el análisis de ciclo de vida a las viviendas eficientes?	44
14.3.1 Información acerca del edificio	44
14.3.2 Herramientas	45
14.3.3 Consideraciones específicas sobre el ACV	47
13. ¿Dónde se puede obtener más información?	53
Referencias y bibliografía de interés	54



# ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS



- ACV:** Análisis del Ciclo de Vida
- CC:** Cambio Climático
- CEPMC:** Council of European Producers of Materials for Construction (en español, Consejo Europeo de Fabricantes de Materiales de la Construcción)
- CFC:** Clorofluorocarbonos
- DAP:** Declaración Ambiental de Producto
- EICV:** Evaluación de Impactos de Ciclo de Vida
- GEI:** Gases de Efecto Invernadero
- HA:** Huella de Agua
- HC:** Huella de Carbono
- ICV:** Inventario de Ciclo de Vida
- IPCC:** Intergovernmental Panel on Climate Change (en español, Panel Intergubernamental de Cambio Climático)
- IRAM:** Instituto Argentino de Normalización y Certificación
- ISO:** International Organization for Standardization (en español, Organización internacional de normalización)
- LCA:** Life Cycle Assessment (en español, Análisis del Ciclo de Vida)
- PCG:** Potencial de Calentamiento Global
- RCP:** Reglas de Categoría de Producto
- SETAC:** Society of Environmental Toxicology and Chemistry (en español, Sociedad de Química y Toxicología Ambiental)
- UF:** Unidad Funcional
- UNE-EN:** Asociación Española de Normalización-Norma Europea
- US EPA:** United States Environmental Protection Agency (en español, Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos)
- WFN:** Water Footprint Network (en español, Red de Huella Hídrica)



# INTRODUCCIÓN

La preocupación mundial por el cambio climático (CC), asociada a las evidencias científicas sobre su existencia, y las consecuencias que este cambio traería (alteración en los patrones de precipitaciones, extinción de especies, cambio en los rendimientos de las cosechas, escasez hídrica, aumento del nivel de los océanos, etc.), han motivado el diseño, desarrollo e implementación de acciones de mitigación y adaptación para reducir sus impactos negativos, no sólo por parte de los gobiernos, sino también de las empresas.

Esto, a su vez, ha determinado la necesidad de contar con indicadores y metodologías, que permitan cuantificar la efectividad de esas acciones, siendo la Huella de Carbono (HC) la más específica para la categoría ambiental del cambio climático. La HC cuantifica la cantidad total de emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a un producto a lo largo de su ciclo de vida.

Resulta claro que el cambio climático es sólo una de varias preocupaciones ambientales que requieren atención. La pérdida de biodiversidad, el adelgazamiento de la capa de ozono, la disponibilidad de agua potable, las reservas de energía o la eutrofización de aguas son ejemplos de otros impactos ambientales que, por su repercusión sobre la salud humana, de los ecosistemas o sobre la disponibilidad de recursos naturales, causan profunda preocupación en la sociedad actual.

La metodología del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) (en la literatura anglosajona, Life Cycle Analysis o Life Cycle Assessment - LCA) permite considerar todos los atributos ambientales relacionados con la naturaleza, la salud humana y los recursos, con una óptica que difiere de las clásicas, puesto que analiza un sistema considerando todos los consumos y emisiones que ocurren en los distintos momentos de su vida útil. Estos momentos son:

- La fabricación, teniendo en cuenta la extracción de las materias primas del ambiente, el procesamiento, el transporte, la elaboración de un producto, la distribución al mercado.
- La utilización y el mantenimiento.
- El desmantelamiento y el tratamiento de los residuos al final de la vida útil, que puede incluir el reciclaje de los materiales, su utilización en otros procesos industriales, el aprovechamiento del calor resultante de la incineración de sus materiales, su disposición final en vertederos, etc.



El ACV puede entonces definirse como un procedimiento sistemático, objetivo y con base científica, que permite cuantificar todos los consumos de recursos y todas las emisiones asociadas a un producto, desde la cuna hasta la tumba (Figura 1). Esta característica es esencial para identificar posibles intercambios (por ejemplo, mejorar un aspecto ambiental a costa de empeorar otro, o disminuir la carga ambiental en una región, pero aumentarla en otra).



Figura 1. Diagrama del ciclo de vida típico de un producto (Fuente: IK Ingeniería, 2019).

El ACV permite analizar potenciales impactos ambientales utilizando un gran número de indicadores. El más conocido de ellos es, sin duda, la HC. Sin embargo, la Huella de Agua (HA) es otro indicador ambiental incluido dentro del ACV que ha despertado un gran interés entre la comunidad científica en los últimos tiempos. La HA se define como la(s) medida(s) que cuantifican los potenciales impactos ambientales relacionados con el uso de agua durante el ciclo de vida de productos, procesos u organizaciones.

A finales de 2014 se publicó la norma ISO 14046 la cual define principios, requisitos y pautas para la evaluación de la HA. Se espera que en los próximos años este indicador ambiental gane en popularidad y se consolide como un referente de la sostenibilidad ambiental, como ha ocurrido con la HC.

# ESTRUCTURA DEL MANUAL

**El manual se estructura en dos secciones:**

- **Parte I** - Método del Análisis de Ciclo de Vida, que incluye una descripción detallada de los pasos a seguir para llevar adelante un estudio de ciclo de vida de productos, procesos o servicios.
- **Parte II** - Aplicación del análisis de ciclo de vida a materiales y estrategias de construcción de edificios, que describe las áreas problemáticas encontradas para la realización de ACV de las viviendas de interés social, y da pautas sobre cómo adaptar y aplicar el método a las viviendas eficientes.

Se espera que el presente documento sirva como herramienta para la toma de decisiones y guía en evaluaciones futuras de viviendas sociales.

## PARTE I MÉTODO DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

### 1. ¿PARA QUÉ SIRVE UN ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA?

Es usual que algunos consumidores deseen conocer cuáles productos son menos nocivos para el ambiente. Por ejemplo, se podría comparar la utilización de bolsas plásticas de polietileno con la de bolsas de papel; o de una botella de PET con una de vidrio descartable u otra retornable; o de los pañuelos descartables de papel con los lavables de tela. Pero la realidad es mucho más sofisticada y el impacto ambiental asociado con un producto dependerá de tantas variables que esas preguntas sólo podrán contestarse "caso por caso" y no de manera universal. Por ejemplo, la bolsa de papel podrá producirse a partir de madera de una plantación o de residuos forestales o de papel reciclado y, por tanto, el impacto ambiental será completamente diferente. La energía eléctrica utilizada en su proceso podría ser de origen nuclear o hidroeléctrico o solar y, nuevamente, el impacto será muy diferente. El impacto de su transporte será diferente si se realiza por tren o por camión y cambiará según el tipo de embalaje que se utilice. Y, cuando llegue al final de su ciclo útil, el impacto será diferente si la bolsa va a un relleno sanitario, a un incinerador o si se destina a reciclaje.

Sólo un estudio que contemple todas las fases del ciclo de vida de un producto, conocido como enfoque “desde la cuna hasta la tumba” (la Figura 2 representa este enfoque), puede contestar estas preguntas. Pero su utilidad será mucho mayor, permitirá:

- a un productor definir estrategias para mejorar el desempeño ambiental de su producto, ya que conocerá dónde se originan los principales daños y cuáles son;
- a una universidad u organismo de ciencia y tecnología orientar sus actividades de investigación para disminuir los impactos;
- y a los decisores políticos a impulsar compras de uno u otro tipo de bolsas.

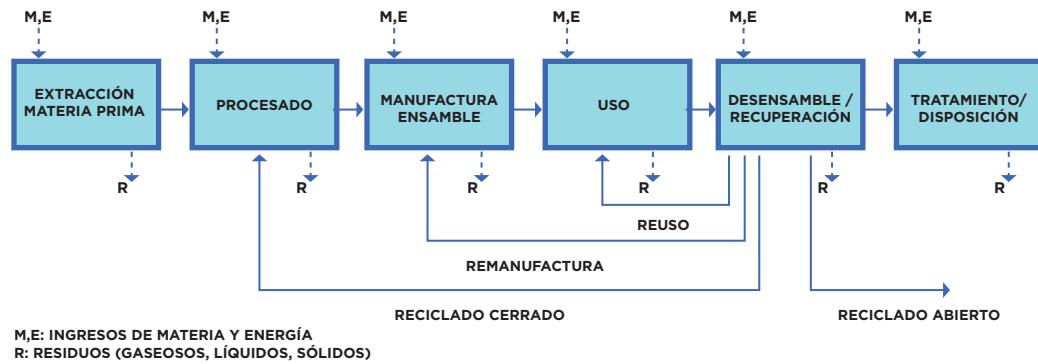


Figura 2. Esquema del ciclo de vida de un producto

## 1.1. EJEMPLOS DE APLICACIONES

Existen muchísimas publicaciones sobre aplicación del ACV a productos de distintos sectores, que involucran diferentes procesos, tecnologías y países. A modo de ejemplo, se citan los títulos de algunos trabajos publicados en distintos idiomas, relacionados con el sector de la construcción y las edificaciones:

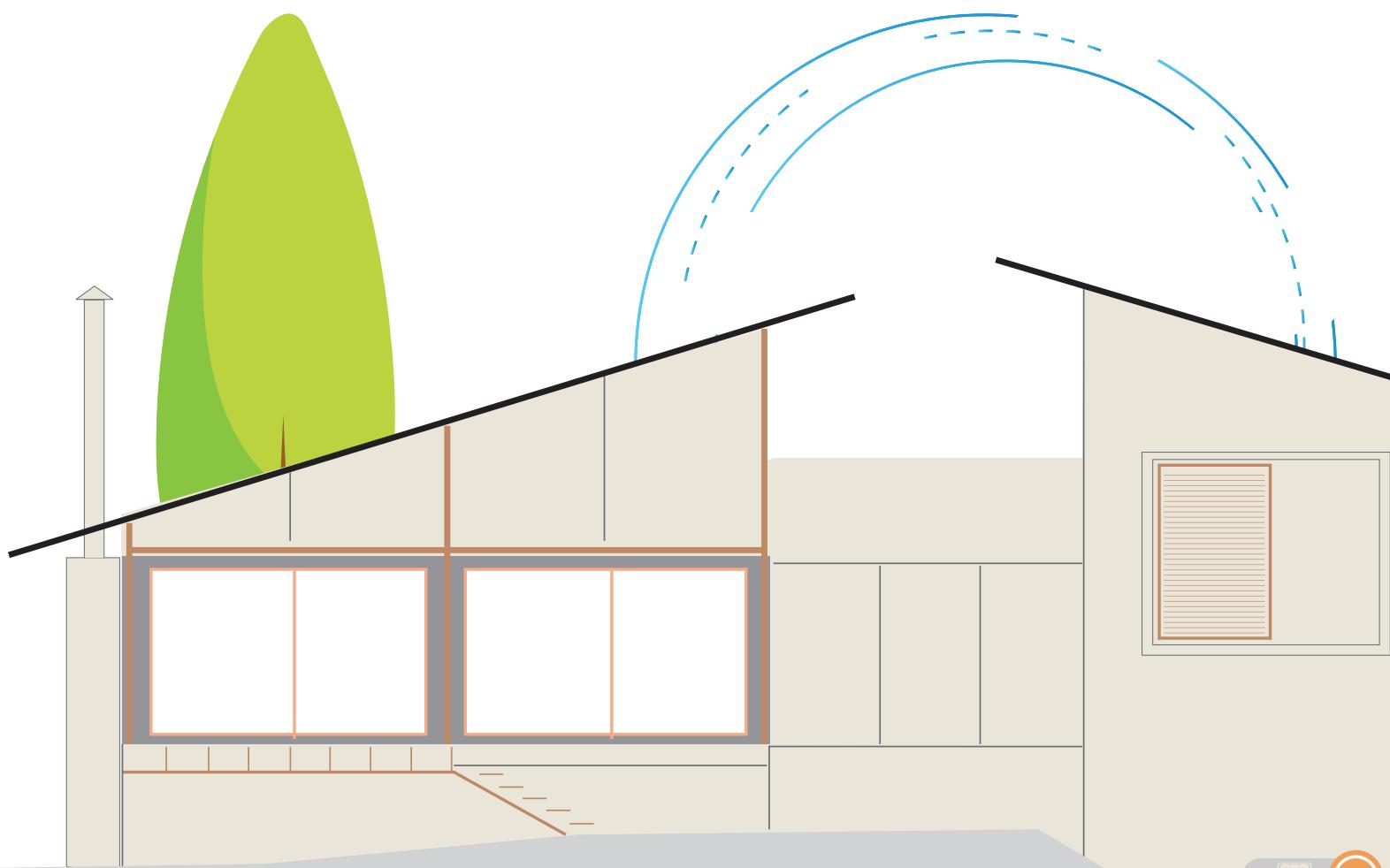
- Ciclo di vita del fotovoltaico e ciclo di vita degli edifici.
- Ecobilancio di manufatti edili in gesso.
- L'analisi di processo nella determinazione del contenuto energetico dei materiali termoisolanti.
- An Industry Average Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Glass Mat Gypsum Panels for the USA and Canadian Markets.
- Environmental assessment of buildings projects based upon a life cycle approach.
- LCA of concrete and steel building frames.
- Life cycle assessment of flooring materials: case study.
- Saving energy vs saving materials. Life cycle inventory analysis of housing in a cold climate region of Japan.
- The application of Life Cycle Analysis in Urban Water Systems.
- Aplicação da avaliação do ciclo de vida na análise de impactos ambientais de materiais de construção inovadores: estudo de caso da pegada de carbono de clíqueres alternativos.



- Análisis de ciclo de vida y reglas de categoría de producto en la construcción. El caso de las baldosas cerámicas.
- Análisis del ciclo de vida de productos derivados del cemento-Aportaciones al análisis de los inventarios del ciclo de vida del cemento.
- Análisis de la energía consumida y las emisiones de CO<sub>2</sub> durante el ciclo de vida de edificios del sector terciario y residencial situados en las Islas Baleares.

## 2. ¿CÓMO SE INICIA UN ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA?

Generalmente, un estudio de esta naturaleza inicia por una demanda externa (por ejemplo, una exigencia del mercado destino de un producto o de la casa matriz de una industria) o interna (por ejemplo, interés por obtener un posicionamiento frente a los consumidores o competidores, búsqueda de mejoras en la eficiencia para disminuir costos productivos). Cualquiera sea el caso, usualmente el estudio es encargado por alguien que no es quien lo va a ejecutar. Quien realiza el estudio es, comúnmente, alguien externo a la organización, que la ayuda a terminar de definir el objetivo y el alcance del estudio, para que sea factible su realización dentro de los límites presupuestarios y temporales definidos.



### 3. ¿QUÉ APLICACIONES TIENE UN ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA?

Las aplicaciones de un análisis de ciclo de vida son innumerables. Sin embargo, la mayor parte de ellas pueden clasificarse en una de las siguientes categorías:

- Desarrollo y mejora de productos.
- Planificación estratégica.
- Desarrollo de políticas públicas.
- Declaraciones ambientales de productos.
- Marketing.

### 4. ¿QUÉ PUEDE OCURRIR TRAS REALIZAR UN ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA?

El resultado de un estudio de ciclo de vida tendrá forma de números, que representan cuál es el impacto del producto o servicio analizado. Estos números constituyen una referencia que permitirá comparar con un producto o servicio equivalente, o bien con el mismo producto en distintos momentos. Lo más importante es que el resultado no es "blindado", sino que tiene trazabilidad, se detecta qué material, proceso, proveedor o etapa del ciclo del producto es responsable de cada efecto analizado. Habitualmente, hay unas pocas causas (materiales, procesos, etc.) que determinan la mayor parte de los impactos. Su identificación permite establecer medidas de mejora trascendentales, evitando realizar otras que sean poco efectivas o, aun, contraproducentes. Estas medidas pueden ser:

- Sustituir algunos materiales del producto.
- Modificar el diseño del producto.
- Buscar proveedores diferentes.
- Modificar un proceso productivo.
- Buscar un embalaje diferente.
- Modificar la fuente energética.
- Modificar el sistema/medio/ruta de transporte.

### 5. ¿QUÉ NORMAS INTERNACIONALES SE APLICAN?

La complejidad de un estudio con un alcance tan amplio, como el del ACV, y la necesidad de obtener resultados objetivos han provocado que la normativa internacional haya trabajado activamente para lograr la estandarización de la metodología. De esta forma, se ayuda a evitar un mal uso de esta herramienta y de los resultados derivados.

Las normas generales que rigen su aplicación son la ISO 14040:2006, que establece los principios y el marco general, y la ISO 14044:2006, que establece los requisitos y líneas guía.

En la Argentina, el Instituto Argentino de Normalización y Certificación (originalmente Instituto de Racionalización Argentino de Materiales: IRAM) está colaborando con la elaboración de estas normas, participando en las actividades del Comité Técnico 207 de ISO, en el Sub-Comité 5.



## 6. ¿QUÉ PUBLICACIONES EXISTEN SOBRE LA TEMÁTICA?

Existe un número muy importante de publicaciones específicas sobre la temática, tanto libros como periódicos (revistas, actas de congresos regulares, etc.). Por otra parte, otras publicaciones, que no tienen como foco esta metodología, tienen en sus contenidos un número creciente de artículos sobre el ACV. Entre las revistas con mayor densidad de artículos sobre la temática se encuentran el International Journal of Life Cycle Assessment, el Journal of Cleaner Production, el Journal of Industrial Ecology, el Journal of Environmental Management y el Journal of Resources, Conservation and Recycling (Figura 3).



Figura 3. Revistas científicas específicas relacionadas con el Análisis del Ciclo de Vida

## 7. ¿CÓMO SE DEFINE EL MÉTODO DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA?

En 1993, la Sociedad de Toxicología y Química Ambiental definió al método del ACV como sigue (SETAC 1993):

"Es un procedimiento objetivo de evaluación de cargas energéticas y ambientales correspondientes a un proceso o a una actividad, que se efectúa identificando los materiales y la energía utilizada y los descartes liberados en el ambiente natural. La evaluación se realiza en el ciclo de vida completo del proceso o actividad, incluyendo la extracción y tratamiento de la materia prima, la fabricación, el transporte, la distribución, el uso, el reciclado, la reutilización y el despacho final."

Se puede desarrollar un ACV para un proceso, un servicio o una actividad, considerando todas las etapas que constituyen su vida útil.

Los primeros estudios realizados con una óptica de ciclo de vida se orientaron fundamentalmente al estudio del consumo de energía.

A medida que las preocupaciones ambientales fueron cambiando, se fue ampliando el universo de sustancias y efectos analizados.

## 8. ¿CÓMO SE REALIZA UN ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA?

Las citadas normas ISO 14040 e ISO 14044 establecen con claridad el marco y los lineamientos para realizar un estudio de ciclo de vida.

El método tiene cuatro partes fundamentales (Figura 4):

1. La **definición de objetivos y alcance**, donde se establecen la finalidad del estudio, los límites del sistema, los datos necesarios, las hipótesis y los límites del análisis.
2. El **inventario**, que se configura como una cuantificación de todos los flujos de materiales y de energía que alimentan el sistema productivo y todos los flujos salientes (productos, subproductos, emisiones gaseosas, líquidas y sólidas).
3. La **evaluación de impactos**, que transforma los resultados del inventario en impactos ambientales.
4. La **interpretación**, es decir, un análisis crítico del estudio que permite establecer las conclusiones y recomendaciones para reducir los impactos detectados, así como la confiabilidad del estudio, los aspectos que deben mejorarse, etc.

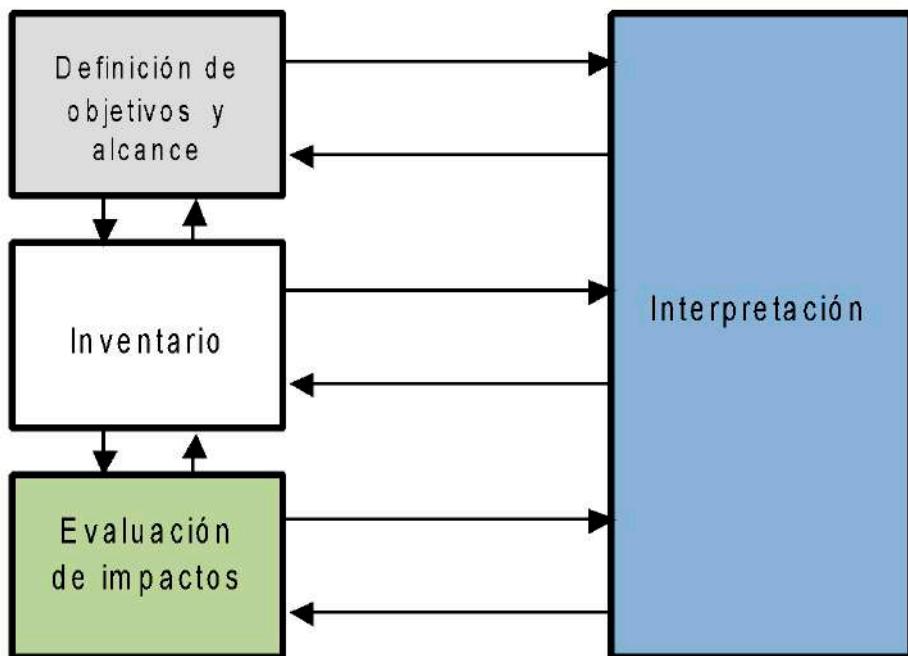


Figura 4. Fases fundamentales del Análisis del Ciclo de Vida (Fuente: Adaptado de ISO, 2006).

En función de los resultados y conclusiones obtenidas tras realizar el análisis, entre las que se pueden encontrar los puntos críticos (materiales y/o procesos más influyentes sobre el impacto ambiental), se puede continuar el estudio con una etapa de mejoramiento, esto es, un análisis que conduce a la elaboración de propuestas que reduzcan el impacto producido por el sistema analizado. Por este motivo, el análisis es iterativo en general.

La complejidad de un estudio de ciclo de vida se ve compensada por las siguientes ventajas:

- Brinda una estimación de los impactos totales producidos por el sistema.
- Identifica cuándo se produce un cambio de tipo de impacto como consecuencia de una modificación, en lugar de una mejora real.
- Facilita la toma de decisiones.

## 9. ¿CÓMO SE PUEDE SIMPLIFICAR LA REALIZACIÓN DE UN ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA?

El método del ACV es de carácter dinámico. Las cuatro etapas en las que se realiza están relacionadas entre sí, lo que implica que, a medida que se obtienen resultados, se pueden modificar o mejorar los datos, las hipótesis, los límites del sistema o los objetivos, exigiendo el cálculo iterativo. Este hecho, más la gran cantidad de datos requeridos para realizar un ACV, determinan que, en general, un estudio de ciclo de vida se realice utilizando un programa informático específico que simplifica la tarea.

Existen en el mercado diversos programas comerciales disponibles, entre los cuales se destacan por su penetración en el mercado SimaPro, Gabi, Boustead Model, Umberto, etc. Existen también programas gratuitos, como OpenLCA, que es de aplicación para cualquier sector, o algunos específicos para un sector, como es el caso del danés SBIDB y el canadiense Athena LCA, aplicables al sector de la construcción. Estos programas incluyen bases de datos más o menos extensas, que pueden ser de gran ayuda para el usuario, aunque el uso de datos que no correspondan con el sistema en estudio debe siempre hacerse con gran cuidado. En general, los programas informáticos de uso libre pueden incluir bases de datos comerciales, cuyo acceso sí requiere pago de licencia.

Merece destacarse que la mayoría de la información disponible para realizar un ACV es de carácter internacional, con bases de datos globales y escasa presencia de perfiles ambientales nacionales.



# 10. DESCRIPCIÓN DE LAS FASES PARA REALIZAR UN ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

Seguidamente, se describen los elementos más importantes que conforman las cuatro fases para realizar un ACV.

## 10.1. FASE 1: DEFINICIÓN DE OBJETIVOS Y ALCANCE

El objetivo del estudio se define respondiendo a la pregunta: ¿para qué se realiza el estudio?

De este modo, se especifica la aplicación propuesta, incluyendo las razones por las cuales se lleva a cabo el estudio y su público objetivo, es decir, para quién están destinados los resultados.

Algunos ejemplos son:

- Comparación de productos alternativos con objetivos de marketing o de regulación.
- Identificación de alternativas de diseño innovadoras.
- Identificación de los materiales o procesos que más contribuyen al impacto analizado.

Por su parte, el alcance indica la amplitud, profundidad y detalle del estudio, mediante la definición de los límites del sistema, la unidad funcional, la calidad requerida de los datos, etc.

Se facilita su definición dando respuestas a las siguientes preguntas:

- ¿Cuál es el propósito del sistema?
  - Función o funciones del sistema.
- ¿Cuál es la base de evaluación?
  - Unidad funcional; por ejemplo: 1 kg de producto o 1 L o 1 m<sup>2</sup>.
- ¿Qué apariencia tiene el ciclo de vida?
  - Definición del sistema, establecimiento de sus límites.
- ¿Con qué criterio se repartirán las cargas ambientales si el sistema elabora más de un producto?
  - Métodos de asignación.
- ¿Qué tipos de impacto se evaluarán?
  - Selección de uno o más métodos de evaluación de impacto.
- ¿Cuáles son las hipótesis del estudio?
  - ¿Qué precisión se requiere?
- - Calidad de los datos.
  - ¿Quiénes son los destinatarios?
- - Formato del reporte.

A continuación, se citan ejemplos de algunos objetivos de estudios de ciclo de vida:

- Bloques de hormigón: comparación de materias primas de distinto origen (áridos naturales versus áridos reciclados).
- Eficiencia energética: comparación de soluciones constructivas (ventanas eficientes versus láminas de control solar adheridas a los vidrios comunes).
- Iluminación: comparación de lámparas incandescentes versus compactas de bajo consumo.
- Cerramientos: evaluación de distintas alternativas de carpintería de ventanas usadas en la construcción de edificios (madera, aluminio, metálica).

- Electricidad: comparación de distintos sistemas de generación, comparación del impacto ambiental según la fuente, evaluación del impacto sobre el cambio climático.

## 10.1.1. LA DEFINICIÓN DEL SISTEMA Y SUS LÍMITES

Por definición, en un ACV se deberían considerar todos los flujos de materiales y de energía que se requieren para elaborar un producto o prestar un servicio, y todos los flujos residuales que aparezcan, considerando todas las fases de su ciclo de vida (extracción de materia prima, elaboración de insumos, componentes, transportes, procesos, etc.). Los flujos de materia y de energía que son incluidos en el inventario deben cumplir las siguientes condiciones:

- Los flujos de entrada al sistema deben ser considerados en la forma en la que se encuentran en el ambiente natural, sin previa modificación humana.
- Los flujos de salida serán aquellos que irán a formar parte del ambiente exterior al sistema considerado, sin sufrir transformaciones posteriores por parte del hombre.

Dada la complejidad del sistema industrial actual, la evaluación de todos los materiales y los procesos que intervienen en la elaboración de un producto es sumamente complicada. Quien quiere evaluar el impacto del producto que elabora, comienza por "escarbar" en su industria en búsqueda de toda la información posible. Pero toda industria tiene proveedores, que elaboran insumos en sus propias fábricas, que a su vez tienen otros proveedores. Entonces cabe preguntarse: ¿hasta dónde se debe continuar? Por otra parte, en la fabricación de casi cualquier producto, por ejemplo, ladrillos, hace falta una o varias formas de energía en alguno o varios puntos de su cadena productiva. Pero la energía es obtenida en otro sistema industrial, muy ajeno al fabricante de ladrillos, quien no tiene ninguna información sobre cuáles son los impactos que produce. Puede producirse a partir de combustibles fósiles, de materiales fisibles, del caudal de un río o de otra fuente renovable de energía (radiación solar, viento, biomasa). A su vez, la propia central eléctrica estará construida con distintos materiales, que son elaborados en otros sistemas productivos, que a su vez consumen electricidad. Se comprende que, al analizar un producto cualquiera, habrá que conocer todos los procesos que aparecen "aguas arriba". Por su parte, los flujos residuales tendrán distinto impacto según cuál sea su tratamiento: incineración con recuperación de energía, reciclado, recuperación de materiales, disposición controlada, etc. Es decir, también será necesario conocer lo que ocurre "aguas abajo" del sistema que interesa.

Resulta claro que el número de flujos de materia y de energía que intervienen es sumamente grande y el modo de relación entre sí es muy complejo. Esto implica que el estudio sea también muy complicado. En consecuencia, será necesario establecer estrategias que mantengan el análisis en un equilibrio que concilie la practicidad y la consistencia. Estas pueden incluir la definición de reglas de corte, que desprecien aquellos flujos que contribuyan por debajo de cierto valor umbral. Esto se justifica en que, por lo general, un pequeño número de procesos es responsable de la mayor parte de los impactos. También se pueden especificar procesos o materiales que se dejarán afuera del estudio por otras causas, por ejemplo, por falta de información o porque esta es poco confiable (Figura 5). De este modo, se establecen los límites del sistema en estudio, documentando las exclusiones e inclusiones.



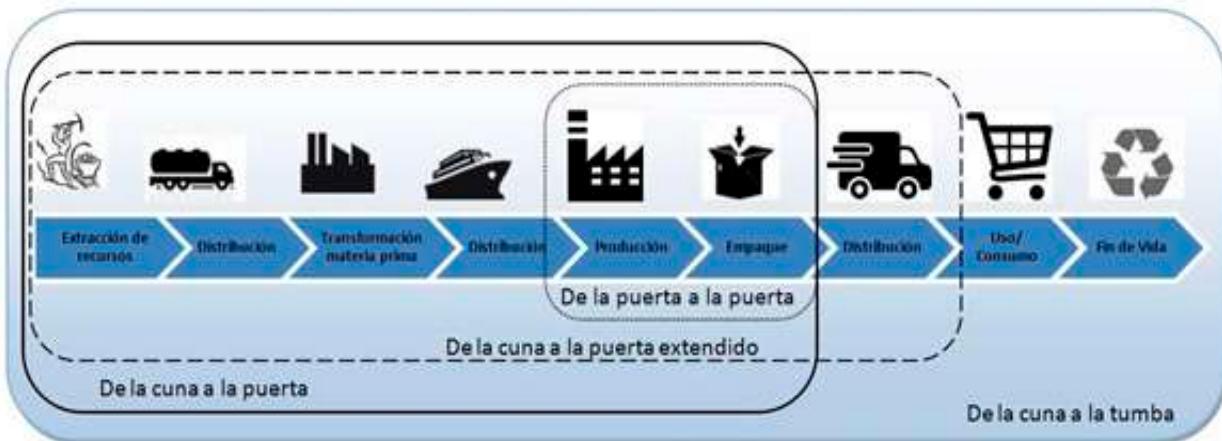


Figura 5. Límites del sistema típicamente utilizados en un Análisis del Ciclo de Vida.

Si bien la definición del método adhiere a la elección de los límites indicados dentro del recuadro azul de la Figura 5 ("de la cuna a la tumba"), es lícito modificar el alcance según el objetivo del estudio, siempre que esto sea adecuadamente anunciado en el reporte de resultados. Cuando sólo se consideran los impactos asociados desde la obtención de la materia prima y la energía requeridas para la elaboración del producto hasta que este se encuentra en la planta lista para ingresar en el mercado, el estudio es conocido como "de la cuna a la puerta" (límites indicados con línea negra continua en la Figura 5). Esto puede ampliarse para incluir alguna etapa posterior, por ejemplo, el transporte hasta un centro de distribución (límites indicados con línea de trazos en la Figura 5). Si, en cambio, se incluyen únicamente los procesos que intervienen dentro de los límites del sistema producto, el estudio se denomina "de la puerta a la puerta" (límites indicados con línea de puntos en la Figura 5).

La Figura 6 muestra un ejemplo de límites para un sistema de producción de rollizos de madera.



Figura 6. Límites para un sistema de producción de rollizos.

## 10.1. FASE 1: DEFINICIÓN DE OBJETIVOS Y ALCANCE

Una característica distintiva del ACV es que relaciona el impacto sobre el ambiente con la función del producto analizado. Por ello, el punto central no es el producto en términos físicos, sino el servicio o función que este ejerce y sobre esto se debe evaluar el impacto producido. La función es, por lo tanto, aquello para lo que debe servir el producto o servicio.

Por lo tanto, para poder comparar diferentes productos o sistemas se debe identificar su función y poder cuantificarla.

Algunos sistemas son multifuncionales, es decir, satisfacen más de una necesidad. Por ejemplo, algunos materiales aislantes poseen superficies coloreadas que hacen innecesaria la capa de pintura. En la Tabla 1 se presentan algunos ejemplos.

Tabla 1. Ejemplo de sistemas multifuncionales (sistemas que satisfacen más de una necesidad).

Ejemplo	1	2
Sistema	Vacuno	Cogeneración
Funciones	Producción de carne Producción de leche Producción de cuero	Generación de energía eléctrica Producción de vapor

### 10.1.3. SELECCIÓN DE LA UNIDAD FUNCIONAL

Una vez elegida la función, se selecciona la unidad funcional (UF), que representa la referencia elegida para expresar los resultados. Es decir, la UF es la cuantificación del servicio suministrado por el sistema, la unidad común que representa la función del sistema.

Los resultados de los cálculos de un ACV se refieren siempre a la UF. Por lo tanto, esta debe ser un valor cuantificable y aditivo.

A modo de ejemplo, si se analizan distintas alternativas para secar manos (secador eléctrico, toalla de algodón lavable, toallas de papel descartables) con el objetivo de identificar el menos nocivo para el ambiente, se puede elegir como unidad funcional "secar 1000 pares de manos". Así se calculará el impacto de secar 1000 pares de manos con toallas de papel, secador eléctrico y toalla de algodón, y se obtendrá la respuesta sobre cuál es la mejor alternativa.

A continuación, se describen algunos ejemplos de evaluación de sistemas fotovoltaicos:

- La unidad funcional del estudio se define como 1 kWh producido por un sistema fotovoltaico durante su vida útil, ya sea que se inyecte a la red de distribución o que se consuma (Evon et al. 2013).
- La unidad funcional para el ACV se define como 1 m<sup>2</sup> de área de módulo. Para estimar la energía producida, se asume una eficiencia del módulo de 20,1 % y un desempeño total del sistema de 80 % para instalaciones montadas en el suelo (Pacca et al. 2007).
- La comparación del desempeño del sistema es evaluada con base en una unidad funcional de 1 kWh. Esto es, las entradas de energía y materiales en el ciclo de vida del sistema y la respectiva cuantificación de sus emisiones son normalizadas con base en un total esperado de electricidad producida, luego de considerar las pérdidas por conversión, como el uso del inversor (Fthenakis et al. 2011).
- La unidad funcional es una unidad de módulo fotovoltaico con una capacidad de 1 kWp, en las condiciones meteorológicas holandesas. Para un módulo tandem InGaP/mc-Si, con una eficiencia de conversión de 25 %, esto corresponde con una superficie de 4 m<sup>2</sup> (Meijer et al. 2003).

## 10.1.4. IDENTIFICACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL PRODUCTO Y DEL FLUJO DE REFERENCIA

Una vez definida la unidad funcional, es necesario calcular la cantidad de producto necesaria para satisfacer esa función cuantificada. Esta cantidad se denomina Flujo de Referencia.

Por ejemplo, siguiendo con el ejemplo de secado de 1.000 pares de manos, el flujo de referencia para el caso de toallas de papel desechables podría ser "2.000 toallas de papel", si hiciera falta una toalla por mano (lo que constituye el rendimiento del producto "toalla de papel").

## 10.1.5. COMPARACIÓN DE PRODUCTOS

La definición de la UF está estrechamente relacionada con el objetivo del estudio. Si este es la comparación de productos, se debe estar seguro que la comparación sea válida, que eventuales funciones adicionales han sido identificadas y descriptas, y que todas las funciones relevantes han sido consideradas. En los estudios comparativos, la selección de funciones es más importante que en estudios no comparativos. Por ejemplo, en el caso de botellas, es posible encontrar soluciones técnicas que satisfagan la función de protección de bebidas, pero que el productor o el consumidor no consideren como equivalentes o aceptables.

Por lo tanto, es necesario cerciorarse de que la comparación se basa en la misma UF y en consideraciones metodológicas equivalentes, como el rendimiento, los límites del sistema, la calidad de los datos, los procedimientos de asignación, etc. A modo de ejemplo, se presenta la Figura 7, donde se comparan dos sistemas de iluminación.

Producto	Unidad Funcional	Flujo de referencia	Parámetros clave
Incandescente	600 lumen durante 6000 hs	6 de 60W 	Eficiencia: 10 lm/W Vida útil: 1000 hs
Compacta	600 lumen durante 6000 hs	1 de 11 W 	Eficiencia: 55 lm/W Vida útil: 6000 hs

Figura 7. Comparación de dos sistemas de iluminación.

La Tabla 2 presenta algunos ejemplos adicionales de producto, funciones, funciones seleccionadas para el ACV, unidades funcionales, rendimiento del producto y flujos de referencia, donde se pueden observar los conceptos descriptos.

Tabla 2. Ejemplos de la evaluación de diversos productos para ilustrar los conceptos de función, UF y flujo de referencia.

Producto	Lámpara	Botella	Secado de manos
Funciones	Proveer iluminación Generar calor	Protección de bebidas Facilitar la manipulación Parte de la imagen del producto	Secar manos Remover bacterias
Función seleccionada para un particular ACV	Proveer iluminación (solo para lámparas de exteriores)	Protección de bebidas	Secado de manos (la función higiénica se ha considerado irrelevante)
Unidad funcional	300 lux en 50.000 horas correspondientes al espectro solar de 5.600 K	50.000 litros de bebidas protegidas entre el tapado y el consumo	1000 pares de manos secas
Rendimiento del producto	100 lux con una vida útil de 10000 horas	botellas de 0.5 litros no retornables	Una toalla de papel por cada mano seca
Flujo de referencia	15 lámparas de 100 lux con una vida útil de 10.000 horas	1.000.000 botellas de 0,5 litros no retornables	2.000 toallas de papel

## 10.2. FASE 2: EL INVENTARIO DE CICLO DE VIDA

El Inventario de Ciclo de Vida (ICV) es definido por la ISO como la "recopilación y cuantificación de entradas y salidas para un sistema-producto a lo largo de su ciclo de vida" (ISO 14040, 2006). Básicamente, consiste en un balance de masa y de energía del sistema, aunque puede incluir otros parámetros, como radiaciones, ruido, etc.

Durante la fase del inventario se calculan los requerimientos energéticos y materiales del sistema y la eficiencia energética de los distintos componentes. Asimismo, se identifican y cuantifican los flujos salientes del sistema, que se pueden manifestar como flujos gaseosos, líquidos o sólidos.

La confección del ICV es la fase más laboriosa de un estudio de ciclo de vida. Sin embargo, las decisiones tomadas en la etapa anterior (definición de objetivos y alcance) tienen, muchas veces, mayor influencia sobre los resultados.

### 10.2.1. DEFINICIÓN DE LAS ENTRADAS Y SALIDAS DEL SISTEMA

El proceso a seguir para determinar las entradas y salidas de materiales y energía del sistema está constituido por los siguientes pasos:

1. Construcción del diagrama de flujo del sistema.
2. Determinación de procesos unitarios del sistema del producto.
3. Recolección inicial de datos para cada proceso unitario.
4. Aplicación de reglas de decisión o de corte.
5. Asignación de cargas.

## 10.2.2. CONSTRUCCIÓN DEL DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA

Es una representación gráfica de las relaciones entre los procesos involucrados y los flujos de materia y energía incluidos en el estudio de ciclo de vida.

Existen distintos modos de realizar esta representación para un mismo producto. Como ejemplo, se ofrecen las Figuras 8, 9 y 10, que muestran diagramas de flujo para la producción de energía eólica.

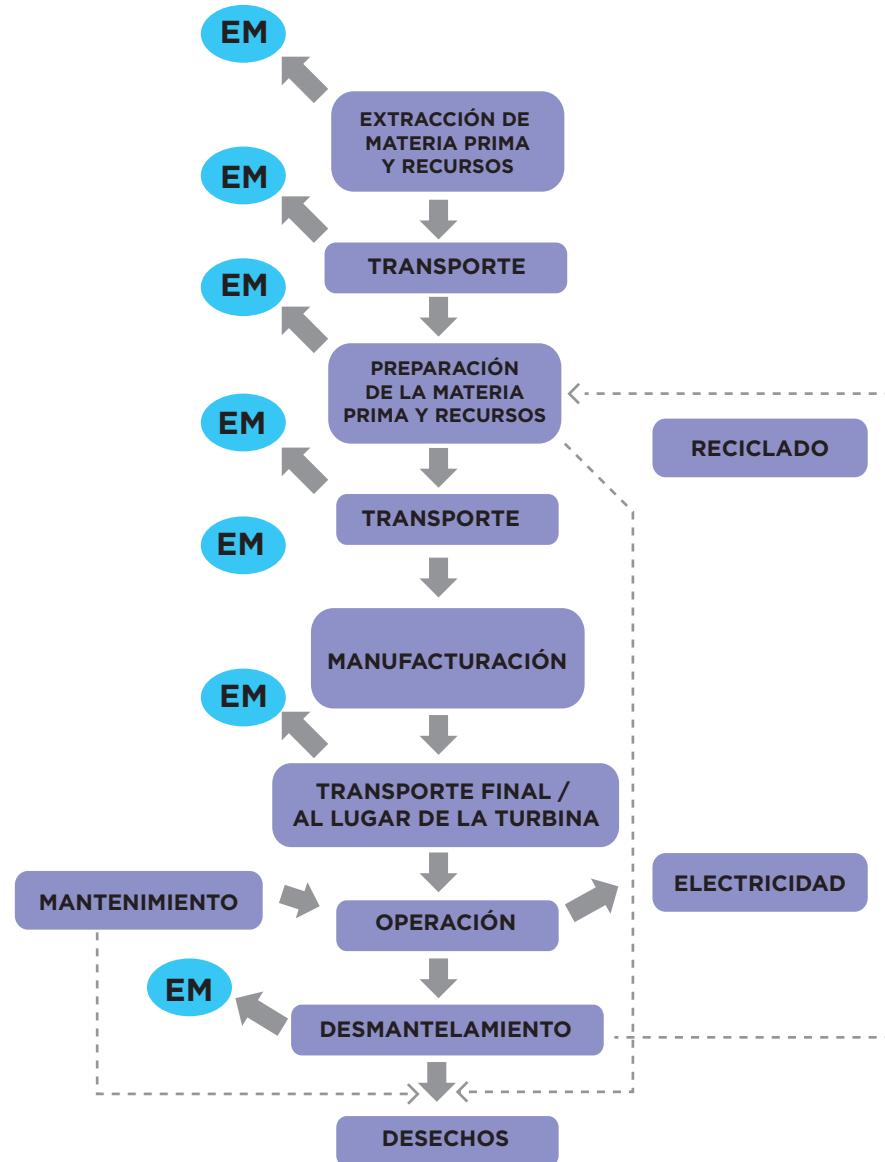


Figura 8. Diagrama de flujo web de la generación de energía en un aerogenerador Vestas

(Fuente: Kaufman Wind Energy, s.f.).



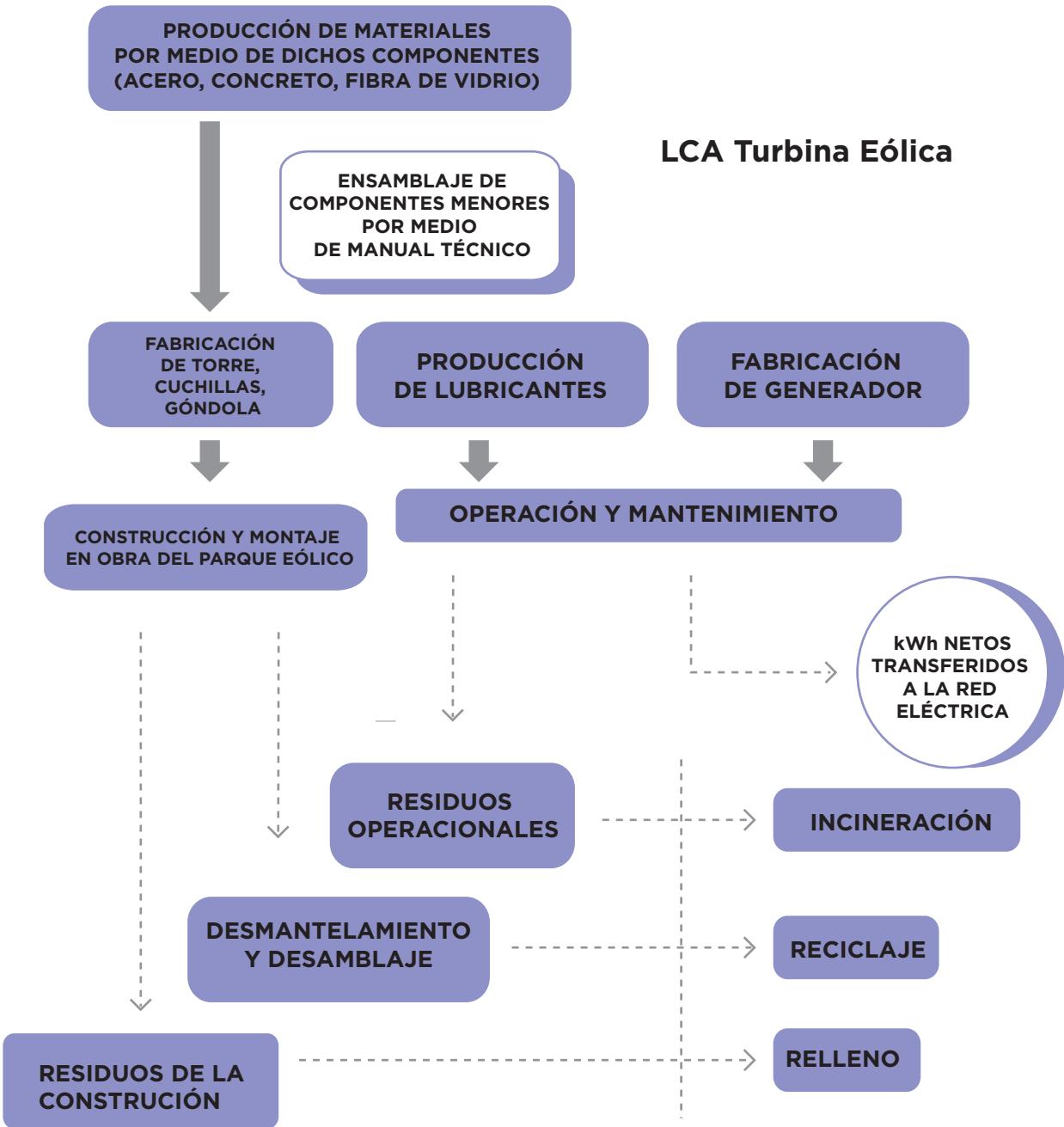


Figura 9. Diagrama de flujo de la generación de energía eólica

(Fuente: Martínez et al. 2009a; 2009b).

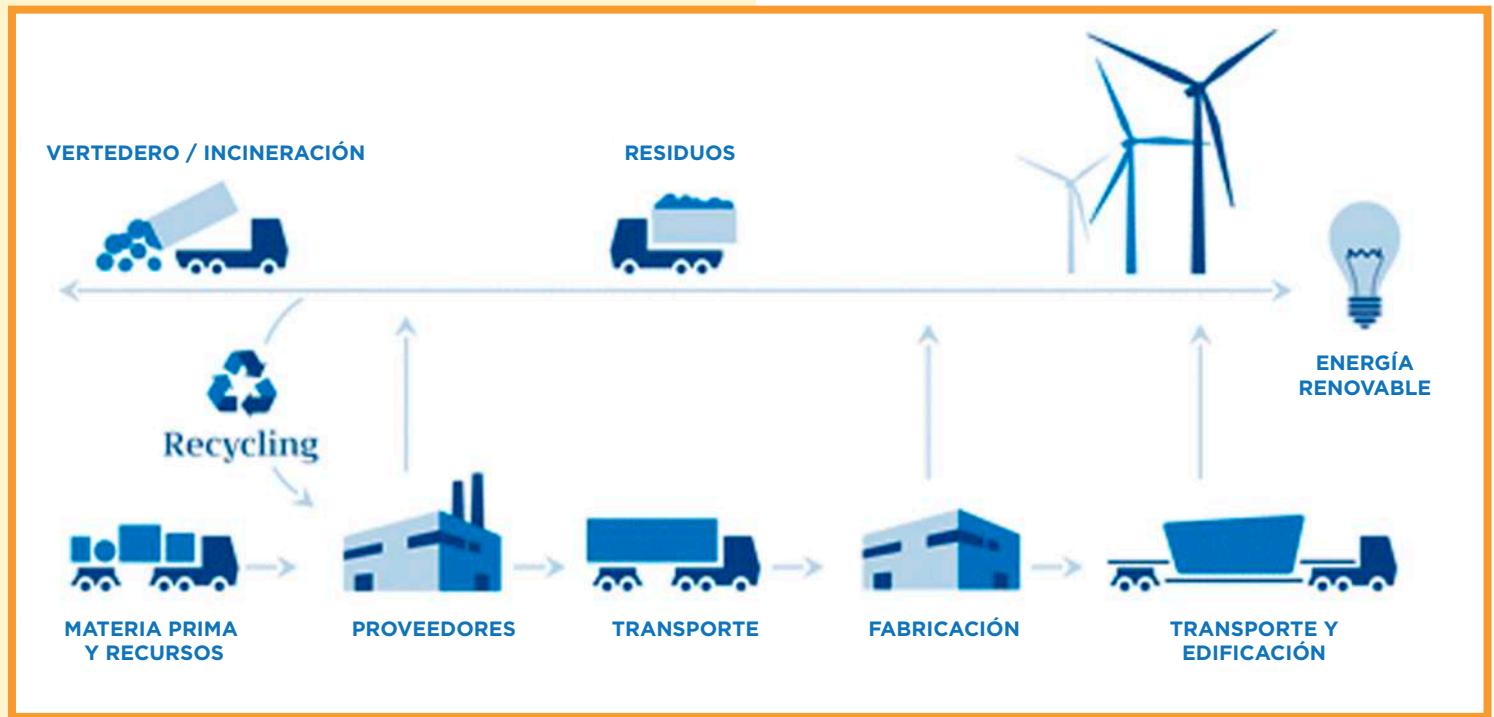


Figura 10. Diagrama general del ciclo de vida de la generación de energía en un aerogenerador Vesta (Fuente: Kaufman Wind Energy, s.f.).

Como se observa en las Figuras 8, 9 y 10, hay muchos modos de realizar un diagrama de flujo de un mismo sistema.

Lo importante es que resulten claras las relaciones entre los procesos y los flujos materiales y energéticos involucrados.



## 10.2.3. DETERMINACIÓN DE PROCESOS UNITARIOS DEL SISTEMA DEL PRODUCTO

Los **procesos unitarios** son las menores porciones del sistema para las cuales existen datos disponibles. Para cada proceso unitario, definido como el elemento más pequeño considerado en el análisis de inventario para la cuantificación de entrada y salida de datos, se determinan las entradas de materia prima o intermedia, las entradas de material auxiliar, las entradas de energía, las emisiones al suelo, al aire, al agua, los desechos a tratar, el producto intermedio y el subproducto.

## 10.2.4. RECOLECCIÓN INICIAL DE DATOS PARA CADA PROCESO UNITARIO

El ICV de un cierto producto está compuesto de datos primarios o propios y secundarios o de fondo. Los datos propios son específicos del sistema en estudio. Sin datos propios no hay resultados específicos. Los datos de fondo son los que no están dentro del alcance del sistema en estudio, como la matriz energética.

Tanto los datos propios como los de fondo deben respetar los mismos principios comunes (consistencia, transparencia, etc.), para que los resultados sean atendibles. Sin principios comunes no hay resultados consistentes.

Una buena práctica para obtener datos confiables es la de diseñar y enviar un cuestionario a los proveedores, quienes a su vez pueden copiarlo y enviarlo a sus propios proveedores.

Para cada proceso unitario se debe establecer claramente la unidad de referencia, los límites del proceso unitario considerado, la materia prima que requiere, la energía, los flujos salientes, los embalajes que intervienen, los productos de limpieza y materiales auxiliares. Otros datos importantes son la situación geográfica, la tecnología utilizada, la validez temporal, etc.

Para cada entrada o salida es necesario calificar el dato conseguido, como, por ejemplo, si se trata de un promedio, cómo se ha recogido el dato (medición continua, consumo acumulado, estimado, etc.), métodos de medición utilizados, métodos de cálculo utilizados, datos sobre la persona que recolectó los datos, etc. También es necesario indicar, si es posible, información estadística, como el desvío estándar, tipo de distribución, etc. Otra información importante es la proveniencia de los flujos de entrada y el destino de los flujos de salida, así como las características cualitativas.

El transporte se debe reportar, en lo posible, como un proceso unitario separado. El sistema de transporte utilizado se caracteriza por sus tres componentes:

- La infraestructura involucrada (rutas, conductos, puertos, aeropuertos, etc.).
- El medio de transporte (camiones, buques, avión, etc.).
- El vector energético (diésel, electricidad, gas, etc.).

## 10.2.5. APLICACIÓN DE REGLAS DE DECISIÓN O DE CORTE

Con frecuencia, es necesario aplicar reglas para los flujos de entrada al sistema, de modo de contabilizar solamente aquellos que realicen una contribución importante al sistema. Estas reglas se especifican según el tipo de flujo y deben ser claramente detalladas en el reporte.

**Para la masa:** se pueden descartar los flujos cuyo aporte se halle por debajo de un porcentaje definido del total de masa entrante al proceso (por ejemplo: los flujos cuyo aporte se encuentre por debajo del 1 % del total). También se puede establecer un porcentaje de contribución acumulada al sistema estudiado (por ejemplo: la suma de los materiales incluidos debe superar el 99 % del total de masa entrante).

**Para la energía:** se pueden adoptar criterios semejantes.

## 10.2.6. ASIGNACIÓN DE CARGAS

Existen sistemas multiproductos, es decir, que elaboran más de un producto útil (por ejemplo: una destilería o una central de cogeneración). Para estos casos, es necesario repartir la cantidad de recursos utilizados por el sistema y los problemas ambientales originados por su funcionamiento entre todos los productos generados.

Esta situación es habitual en los sistemas productivos, en los que, además del producto principal, aparecen subproductos que tienen una demanda en el mercado.

El problema es que cada vez que se quiere obtener el producto 1, aparece también el producto 2. Por ejemplo: obtención de carne y cuero a partir de ganado vacuno; generación de cloro, soda cáustica e hidrógeno en la electrólisis de la sal; producción de biodiesel y glicerina en una planta de transesterificación. En consecuencia, es necesario preguntarse ¿cómo distribuir los consumos y emisiones entre ellos?

La asignación de cargas ambientales en sistemas multiproductos tiene una estrecha relación con el alcance del estudio y con el establecimiento de los límites del sistema-producto analizado.

Los distintos enfoques adoptados para la asignación pueden clasificarse en dos metodologías principales: consecuencial y por atributos.

El primero utiliza datos marginales de modo de evitar la realización explícita de una asignación, mediante una expansión de los límites del sistema, que incluya aquellos sistema-productos cuyos mercados, y consecuentemente, su producción, sean afectados por el sistema analizado. Por ejemplo, en la producción de una planta de transesterificación, en la que se considere que se obtienen como productos biodiesel y glicerina, la expansión de límites respondería al esquema presentado en la Figura 11.

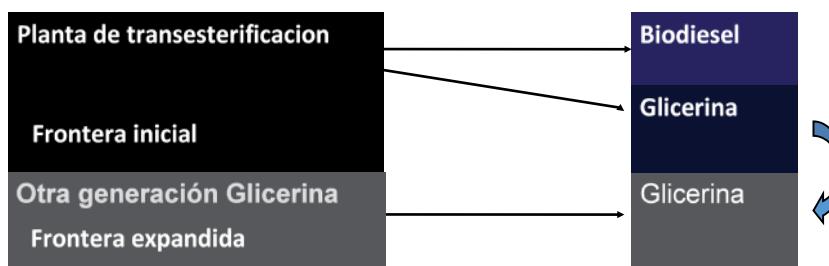


Figura 11. Ejemplo de asignación de cargas por expansión de límites en un sistema multiproducto. Las líneas de trazo representan la ampliación de los límites del sistema

El procedimiento exigiría realizar el ICV de un proceso alternativo de elaboración de glicerina y sustraer las emisiones de este proceso del sistema original para determinar el impacto a asignar al biodiesel.

El enfoque por atributos utiliza, en cambio, datos promedio específicos de los proveedores del sistema analizado y resuelve la asignación de cargas entre co-productos mediante factores de asignación, que pueden basarse en propiedades cuantificables, tales como la masa, el poder calorífico, la energía, el valor económico, etc.

Existen varios criterios para resolver este problema por métodos de atributos, que son los más clásicos. La primera cuestión a definir es un parámetro común a todos los productos para utilizar como base de asignación. Entre las características más utilizadas para distribuir las cargas energéticas y ambientales en un sistema multiproducto se encuentran la masa, el valor económico y la energía asociada a cada producto.

La norma ISO 14044 establece como criterio preferente evitar la asignación donde sea posible mediante: la división del proceso unitario a asignar entre dos o más subprocesos y la recolección de los datos de entrada y salida relacionados con ellos; o la expansión del sistema producto para incluir funciones adicionales relacionadas con los co-productos. Cuando no sea posible, sugiere realizar la repartición de entradas y salidas del sistema entre sus distintas funciones, de modo que se refleje las relaciones físicas que subyacen entre ellas (por ejemplo: según masa, contenido energético, contenido exergético); o la repartición de entradas y salidas entre los co-productos en proporción a su valor económico.

Un ejemplo de aplicación es el de la generación fotovoltaica integrada al edificio. En la Figura 12 se muestra la aplicación de un sistema con doble función, implementada en la Universidad Tecnológica Nacional-Facultad Regional Mendoza, donde se instalaron paneles fotovoltaicos como aleros. De esta forma, los paneles generan energía eléctrica y contribuyen al sombreado interior del edificio. En este caso, las cargas ambientales del sistema se deben repartir entre la función “producción de electricidad” y la función “provisión de sombra”.



Figura 12. Implementación de un sistema fotovoltaico con doble función.

## 10.2.7. LIMITACIONES DEL INVENTARIO

La etapa del inventario no produce una caracterización de los impactos ambientales potenciales, sino que comunica solamente entradas y salidas de materiales y energía. Estos resultados pueden conducir a la elaboración de conclusiones erróneas por sobreestimación o subestimación de la importancia real de los flujos cuantificados. Por ejemplo, volúmenes grandes de emisiones pueden parecer más dañinos que volúmenes pequeños, si no se tiene en cuenta su potencial para causar algún daño ambiental. Por lo tanto, es necesario tener precaución cuando se interpretan los resultados del ICV sin pasar por una etapa de evaluación de los impactos.

Otro aspecto importante es que los resultados del ICV revisten incertidumbre como consecuencia de la acumulación de los efectos debidos a la incertidumbre de los datos utilizados. Un estudio de incertidumbre aplicado al ICV puede ser incluido para explicar y soportar las conclusiones del mismo.

Por otro lado, durante la realización del ICV, se pueden agregar emisiones que ocurren en distintas operaciones, lugares geográficos y tiempos. Esto puede producir una pérdida de transparencia en los resultados obtenidos.

Por último, el ICV es sólo un instrumento entre los varios existentes para asistir en la toma de decisiones basada en consideraciones ambientales. Otras técnicas pueden ser la evaluación de riesgos o la evaluación de impactos in situ, que pueden ser utilizadas en combinación con el inventario cuando el objetivo del estudio lo justifique.

## 10.3. FASE 3: LA EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE CICLO DE VIDA

El resultado que se obtiene de la etapa del inventario consiste en una gran cantidad de datos, que, por lo general, son ordenados en una tabla. Dado el elevado número de datos obtenidos (que pueden alcanzar centenares de valores), es muy difícil hacer una evaluación ambiental de un producto o sistema a partir de ellos.

Por este motivo, luego del realizar el ICV, se procede a la fase de Evaluación de Impactos de Ciclo de Vida (EICV). La EICV es un proceso para caracterizar y estimar los efectos de los resultados del ICV, donde se evalúan las modificaciones ambientales y los consumos de recursos producidos.

En general, se habla de “impactos potenciales”, ya que durante el ICV se realiza una agregación de los valores de emisiones de las distintas sustancias que han sido producidas en las distintas fases y componentes del sistema.

Según la norma ISO 14040, la fase de evaluación de impactos consta de los siguientes puntos obligatorios:

- Definición de categorías de impacto.
- Clasificación.
- Caracterización.



Existen, además, otros elementos opcionales que pueden utilizarse dependiendo del objetivo del estudio:

- **Normalización:** es el cálculo de magnitudes de los indicadores relativos a valores de referencia.
- **Agrupamiento:** consiste en el ordenamiento y ranqueo de los indicadores.  
Ponderación: es la conversión y agregación de indicadores entre categorías de impacto.
- **Análisis de calidad de los datos:** estimación de la confiabilidad de los resultados de la fase de evaluación de impactos

### 10.3.1. DEFINICIÓN DE CATEGORÍAS Y CLASIFICACIÓN

En este paso, se deben definir las categorías de impacto que se considerarán en el estudio. Posteriormente, se procede a clasificar los impactos producidos por las distintas sustancias, definiendo equivalencias entre aquellas que concurren a un efecto particular, mediante el uso de factores de clasificación. La clasificación consiste en la asignación de los resultados del ICV a las categorías de impacto identificadas. Durante la clasificación se condensan los resultados del ICV en un número limitado de aspectos ambientales estudiados, lo que permite realizar una primera interpretación del ACV.

A partir de una intervención ambiental, aparece una cadena de eventos físicos, químicos y biológicos (proceso ambiental), que relaciona un flujo elemental identificado en el ICV con una categoría ambiental afectada. Las categorías pueden considerarse en el punto final de esa cadena (por ejemplo: pérdida de biodiversidad, daños sobre la salud humana, daños sobre los recursos), o bien en algún punto anterior (por ejemplo: cambio climático, adelgazamiento de la capa de ozono, acidificación). En consecuencia, existen categorías de impacto de punto final (en inglés, endpoint) y de punto intermedio (en inglés, midpoint).

Mientras más cerca se considere del punto final, mayor es la claridad de la interpretación, pero también es mayor la incertidumbre de los modelos involucrados (Figura 13).



Figura 13. Ejemplo de una secuencia de cálculo de categorías de impacto Midpoint y Endpoint

Por otra parte, las categorías de impacto de punto intermedio se clasifican en función de la escala en la que actúan (global, regional y local) (Tabla 3).

Tabla 3. Categorías de Impacto Midpoint (punto intermedio) en función de la escala en la que actúan (Badino et al. 1998).

Escala	Efecto
Global	Efecto invernadero
	Adelgazamiento de la capa de ozono
	Consumo de recursos no renovables
Regional	Acidificación
	Eutrofización
	Formación de smog fotoquímico
Local	Toxicidad crónica
	Toxicidad aguda
	Degradación del área
	Disturbios de tipo físico (por ej. ruidos molestos)

Entre los impactos con efecto regional se encuentran aquellos producidos por emisiones en el aire de sustancias contaminantes que actúan negativamente a distancia gracias a los movimientos del aire y a la presencia de gradientes térmicos. La emisión de sustancias que producen efectos negativos a nivel regional interesa no sólo al país donde se producen, sino también a sus limítrofes.

#### 10.3.4. CATEGORÍAS DE IMPACTO MÁS UTILIZADAS

A continuación, se presenta una breve descripción de las categorías de impacto más utilizadas.

#### CONSUMO DE LOS RECURSOS

Por consumo de los recursos se entiende tanto el consumo energético como el consumo de materias primas. Se hace una distinción entre los recursos intrínsecamente renovables (llamados también recursos de flujo) y no renovables (recursos de stock). Entre los primeros están el agua, el viento, la radiación solar y los recursos bióticos, mientras que entre los segundos se encuentran los recursos minerales y el uso de la tierra. Otro modo de clasificarlos es entre recursos bióticos y abióticos.

Puede existir la idea de que los recursos renovables son inagotables. Sin embargo, sólo algunos recursos renovables son inagotables, como la energía eólica, la energía solar, la energía de mareas, etc. Otros, en cambio, son agotables, ya que se caracterizan por una velocidad de regeneración, que limita la capacidad de utilizarlos con el fin de asegurar su continuidad.

Esta clasificación también puede dar la idea de que las reservas de los recursos no renovables están próximas a agotarse. Sin embargo, las empresas mineras deben invertir enormes cantidades de dinero para la prospección geológica, por lo que no avanzan en la detección de reservas más allá de lo necesario para la explotación.



## RECURSOS ABIÓTICOS

Los recursos abióticos pueden ser clasificados en:

**Depósitos:** combustibles fósiles, minerales, sedimentos, arcilla, etc.

**Reservas:** agua subterránea, lagos, tierra.

**Flujo de recursos naturales:** aire, agua, radiación solar, corrientes oceánicas.

Los depósitos son considerados recursos limitados, dado que no son renovables en un período de tiempo relevante.

Independientemente del modo de clasificar los recursos, es un hecho que los recursos limitados tienden a extinguirse, por lo que su uso debe ser realizado en modo cuidadoso y medido.

Uno de los modos de medir el impacto en esta categoría es utilizando la relación "Reserva-Uso" (Ec. 1).

$$W_j = \frac{1}{U_j} = \frac{G_j}{R_j} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde Rj es la reserva de mineral j, Gj es el consumo global actual y Uj es la relación reserva-uso.

## RECURSOS BIÓTICOS

Son las reservas de flora y fauna. Estas reservas pueden ser utilizadas en modo sustentable o no sustentable. Por ejemplo, la explotación de bosques naturales es no sustentable cuando la velocidad de tala es mayor que la de crecimiento. La explotación no sustentable conduce no sólo a la disminución de la reserva, sino que también puede influir en el equilibrio del ecosistema y conducir a la pérdida de otros recursos como, por ejemplo, el material genético.

## CALENTAMIENTO GLOBAL

Es el aumento de la temperatura terrestre debido al aumento de la concentración de gases en la atmósfera, que son transparentes a las radiaciones incidentes del sol, pero no a las radiaciones emitidas por la Tierra (gases de efecto invernadero, GEI).

Entre los gases que aumentan el efecto invernadero natural de nuestro planeta se encuentran el dióxido de carbono, el vapor de agua, el metano, los óxidos de nitrógeno, el ozono troposférico y los fluorocarbonatos, cada uno con distinta potencia para producir este efecto.

El crecimiento de la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera debido a las actividades humanas, principalmente la combustión de combustibles fósiles y la destrucción de las forestas en los trópicos, es considerada la causa principal del calentamiento global.

Existen ciertas tecnologías que se consideran inocuas desde este punto de vista y, no obstante, son grandes contribuyentes para el calentamiento global. Un ejemplo lo constituyen las centrales hidroeléctricas, que inundan grandes porciones vegetadas de tierra, contribuyendo a la liberación de metano por descomposición anaerobia de las plantas. Una represa que inunda una porción amplia y poco profunda para generar energía eléctrica produce durante varios años más emisiones de gases de efecto invernadero que una central de carbón de igual potencia.

En 1990, el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) concluyó que, de seguir con el ritmo actual de emisiones de GEI, cabría esperar un aumento de 0,3 °C por decenio durante el próximo siglo (mayor que el producido durante los últimos 10.000 años). Sin embargo, las emisiones de GEI a la atmósfera han aumentado y se ha observado una tendencia creciente en los eventos extremos de los pasados cincuenta años. Se considera probable que las altas temperaturas, las olas de calor y las fuertes precipitaciones continúen siendo más frecuentes en el futuro.

## ADELGAZAMIENTO DE LA CAPA DE OZONO

El ozono es un gas que se encuentra en pequeñas proporciones en la atmósfera. La capa de ozono se ubica en la estratosfera y funciona como un escudo solar natural para la radiación ultravioleta. Esta capa retiene la radiación ultravioleta incidente, que puede producir importantes daños no sólo sobre la salud humana (cáncer de piel, cataratas, disminución de las inmunodefensas), sino también sobre otros organismos vivos y ecosistemas.

Algunos gases reaccionan con el ozono, formando un nuevo compuesto, liberando oxígeno y produciendo, de este modo, el agujero de la capa de ozono (Figura 14). Los principales responsables son los clorofluorocarbonos (CFC), compuestos atóxicos, no inflamables, con propiedades útiles de condensación, que en los años 80 fueron liberados en la atmósfera en enormes cantidades (1.000.000 t por año). Estos compuestos se hallaban, por ejemplo, en propelentes de aerosoles y en la fabricación de aislantes (CFC 11), en circuitos de refrigeradores, aires acondicionados y aislantes térmicos (CFC 12), en limpiadores de grasas, colas y residuos de placaletas electrónicas (CFC 13), entre otros.

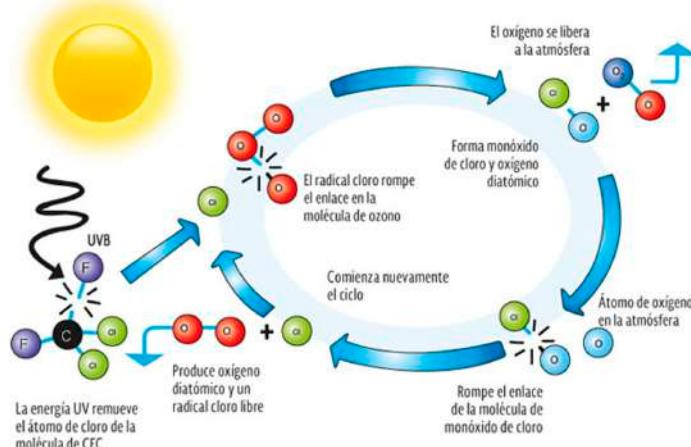


Figura 14. Descomposición del ozono estratosférico (Fuente: Revista Cero Grados, s.f.).

El uso de CFC en aerosoles fue prohibido en Estados Unidos y países escandinavos al final de los años 70. La Conferencia de Montreal - Canadá (1987) y siguientes reuniones dieron lugar a la prohibición de la producción legal de CFC a partir de año 1995 en países desarrollados y del 2010 en países en vías de desarrollo.

## SMOG FOTOQUÍMICO Y OZONO TROPOSFÉRICO

La palabra "smog" proviene de los términos smoke (en inglés, humo) y fog (en inglés, niebla). Se emplea para designar la contaminación atmosférica que se produce en algunas ciudades como combinación de determinadas circunstancias climatológicas con los contaminantes.

Los químicos presentes en el smog incluyen óxidos de nitrógeno, componentes orgánicos volátiles, ozono troposférico y nitrato peroacétílico. El componente más dañino del smog fotoquímico es el ozono troposférico, que se produce por reacción entre contaminantes, principalmente óxidos de nitrógeno e hidrocarburos, bajo el efecto de intensa radiación solar, degradándose los compuestos orgánicos que forman oxidantes fotoquímicos, de los cuales el más importante es el ozono. Este compuesto se forma en concentraciones apreciables en baja altura (troposfera). Su coloración amarilla se debe al NO<sub>2</sub>, que absorbe luz visible próximo al límite del violeta.

El fotosmog es irritante para los ojos y las vías respiratorias aún en dosis muy pequeñas (0,1 ppm). En presencia de otros contaminantes atmosféricos (SO<sub>2</sub>, partículas de polvo) aumenta su toxicidad, pudiendo producir la muerte en altas concentraciones. Asimismo, puede ocasionar daños en plantas (disminuyendo su capacidad de fotosíntesis), en construcciones, monumentos y documentos.

Los centros urbanos son las zonas más riesgosas, por haber mayores emisiones y número de habitantes por unidad de superficie. En lugares donde la radiación solar es fuerte, el problema se presenta con mayor intensidad.

## ACIDIFICACIÓN

La emisión de gases que contengan dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno (SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>) produce que las precipitaciones contengan formas de ácido sulfúrico y nítrico, dando lugar a lluvias más acidas que la natural (pH 5,6) (Figura 15).

Los principales responsables de estas emisiones son los procesos de combustión en centrales eléctricas, en industrias y en transporte (principalmente, por el uso de carbón y, en menor medida, petróleo), el procesamiento de metales, los sistemas de calefacción y los procesos que liberan amoníaco.



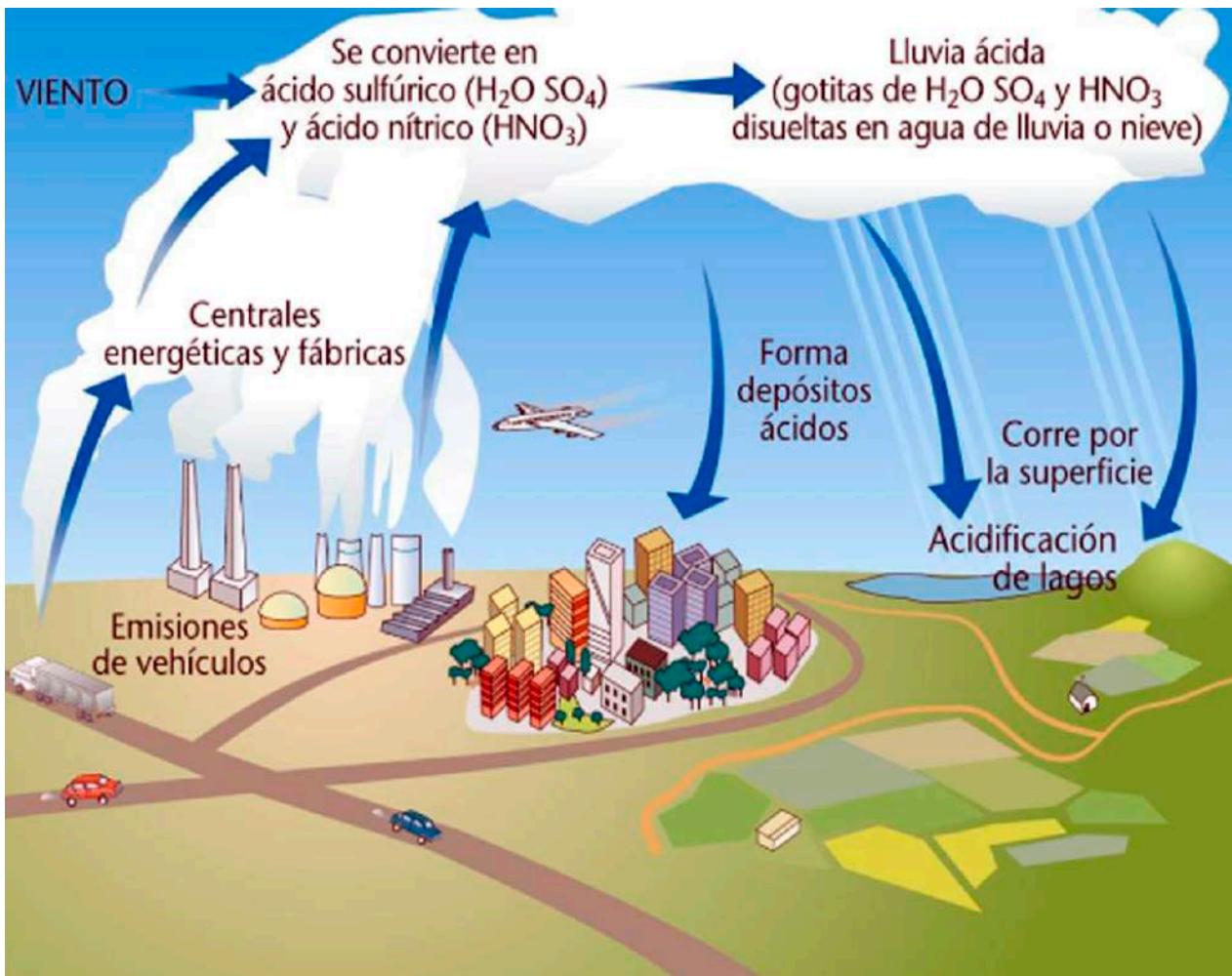


Figura 15. Esquema de la generación de lluvia ácida (Fuente: Barrios Martínez, 2015).

La lluvia ácida produce efectos adversos en el medio terrestre, por ejemplo, causando la muerte de bosques de madera blanda; en los ecosistemas acuáticos, originando, por ejemplo, lagos ácidos sin organismos vivos (Escandinavia); y en las obras humanas, como deterioro de edificios, esculturas y puentes.

## EUTROFIZACIÓN

Se produce por la acumulación en exceso de abonos o nutrientes, tales como nitratos, fosfatos y potasio, en el medio acuático. Esto conduce a una proliferación de algas monocelulares (plancton) y plantas acuáticas superiores, que naturalmente tienen un crecimiento limitado por la disponibilidad de nutrientes. Consecuentemente, la biomasa se descompone, originando una disminución de la disponibilidad de oxígeno, que dificulta el desarrollo de otros organismos o, incluso, lo imposibilita (condiciones anaeróbicas).

En general, los nutrientes que conducen a la aparición del fenómeno de eutrofización son producidos por actividades antrópicas, por ejemplo, por el mal manejo de fertilizantes agrícolas.

Las consecuencias de este fenómeno son, entre otras:

- Malos olores por descomposición de la materia orgánica.
- Interferencia en la navegación de lagos por la presencia de plantas.
- Afectación de las actividades pesqueras locales.
- Mortandad masiva de peces.

## TOXICIDAD

La toxicidad es un término muy genérico, dado que puede referirse a cualquier organismo viviente o a un ecosistema. Entonces se diferencia entre impactos toxicológicos humanos e impactos ecotoxicológicos (sobre el ecosistema).

No existe aún un acuerdo internacional sobre la definición de un parámetro que individualice la toxicidad, por lo que se trata de asociar los efectos macroscópicos a la tipología de la sustancia, a su concentración y al tiempo de exposición, tomando como referencia niveles máximos tolerables de riesgo.

El impacto toxicológico depende de dos factores: el efecto de sustancias químicas o biológicas y la exposición a las mismas. El efecto potencial depende de la emisión real y del destino de las sustancias emitidas.

La Toxicidad humana se mide con el Potencial de toxicidad humana, que representa el volumen requerido para diluir una sustancia hasta que carezca de efecto tóxico. Las sustancias tóxicas presentan baja degradabilidad y alta capacidad de bioacumulación. Algunas de ellas pueden agruparse en: sustancias orgánicas persistentes, compuestos orgánicos volátiles y metales pesados.

La Ecotoxicidad afecta a la flora, la fauna y los ecosistemas en general. Se diferencia entre la Ecotoxicidad acuática y terrestre. A menudo, la acuática se clasifica en marina y de agua dulce. Se caracteriza mediante la concentración máxima permisible a partir de una metodología desarrollada por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA). Algunas sustancias ecotóxicas se agrupan en: metales pesados (Cd, Pb, Hg), compuestos orgánicos persistentes (dioxinas, furanos), hidrocarburos policíclicos aromáticos y otras sustancias orgánicas.

## USO DEL SUELO

El uso de la tierra puede ser considerado bajo dos puntos de vista (Finnveden, 1996):

- Como recurso de los humanos (por ejemplo, para producción de alimentos).
- En relación al ecosistema y la degradación o fragmentación del paisaje, alteración del hábitat, impactos a la biodiversidad, etc.

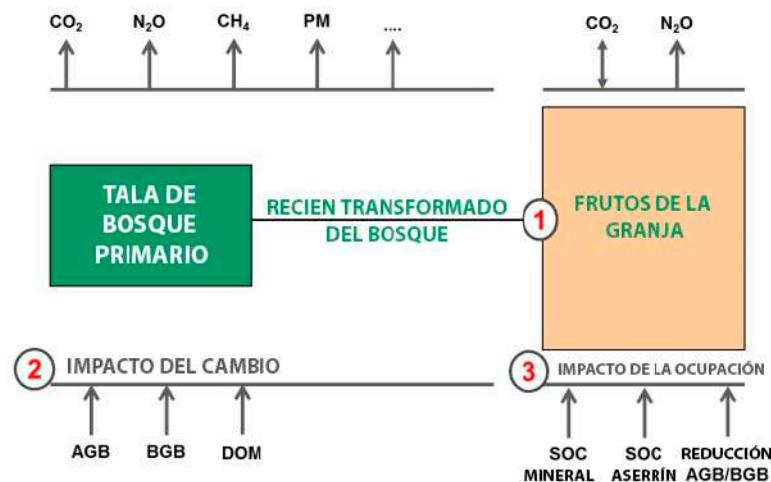
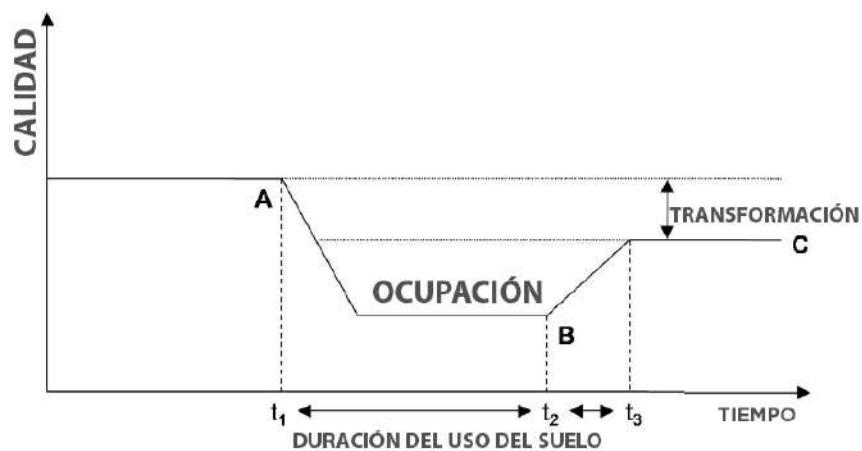
En la actualidad, existe una actividad importante a nivel mundial con el fin de avanzar en el desarrollo metodológico de esta categoría ambiental (ver, por ejemplo, Milà i Canals et al., 2006).

El uso del suelo aparece en todos los posibles procesos, aunque, ciertamente, en algunos es muy intensivo y en otros, insignificante. Algunos ejemplos de actividades de interés en este aspecto son:

- Minería (extracción de recursos).

- Procesos productivos (tierra para agricultura, para una central fotovoltaica, para una industria).
- Urbanización.
- Transporte (construcción de vías de circulación).
- Tratamiento de residuos (relleno sanitario, plantas de separación).

Claramente, el impacto producido por un proceso sobre el suelo es diferente según la condición anterior, es decir, si existía un uso similar o si era un terreno virgen. Se distingue, entonces, entre impactos por transformación del suelo (cambia la calidad del suelo) y por ocupación del suelo (se mantiene la calidad durante un tiempo) (Figuras 16 y 17).



Además de este cambio directo en el uso del suelo, puede aparecer un cambio indirecto en otro sitio, como consecuencia del primero. Por ejemplo, la producción de materias primas agrícolas para generar biocombustibles puede inducir a la transformación de tierras no agrícolas (cambio directo). Pero también puede ocurrir que el uso de cultivos para la producción de biocombustibles genere la necesidad de desplazar la producción de alimentos hacia tierras no agrícolas (cambio indirecto) (Figura 18).

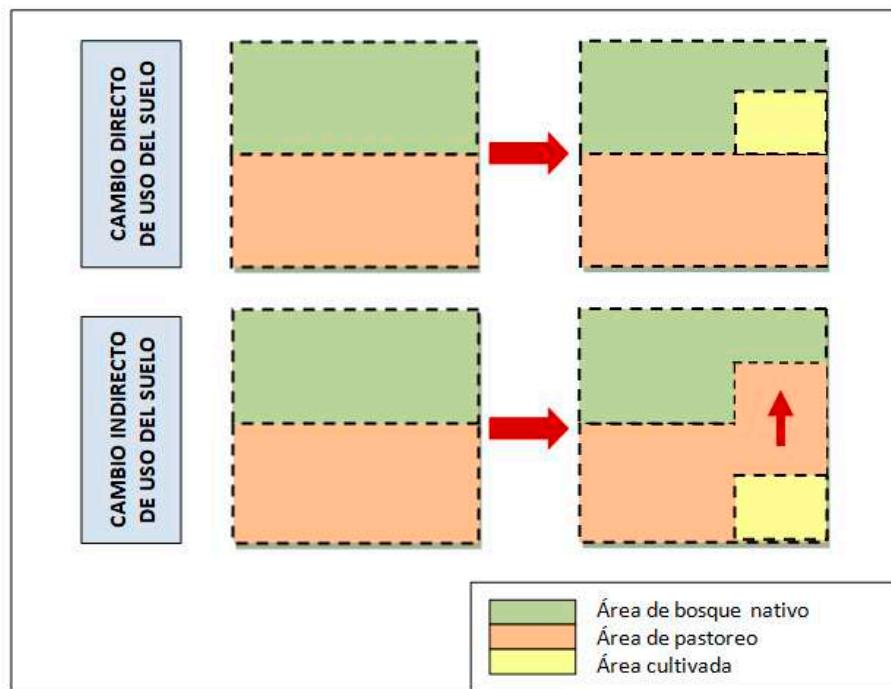


Figura 18. Cambio directo e indirecto de uso del suelo.

## HUELLA DE AGUA

El impacto por el uso de agua ha sido otra categoría de impacto cuyo desarrollo metodológico estuvo postergado durante mucho tiempo en el ámbito de los estudios de ciclo de vida.

Numerosos estudios y propuestas metodológicas se realizaron para evaluar el impacto asociado con el uso y el consumo de agua, apareciendo conceptos como agua virtual y huella hídrica, que incorporaron una visión del problema a lo largo de la cadena productiva de un producto (Hoekstra 2003). El método de la Huella de agua (HA) se explicita en la publicación de Hoekstra et al. (2011), publicado por la Water Footprint Network (WFN). El uso del agua se mide en términos de volumen de agua consumida (evaporada o que no retorna) y/o contaminada por unidad de tiempo. La HA es un indicador geográfico explícito, que no sólo muestra los volúmenes de uso de agua y la contaminación, sino también las ubicaciones. Puede ser calculada para un proceso, un producto, un consumidor, un grupo de consumidores (por ejemplo, un municipio, una provincia, un estado o una nación), un productor (por ejemplo, un organismo público o una empresa privada). El método distingue la HA por "colores":

**Huella verde:** es el volumen de agua de lluvia evaporada o incorporada en el producto.

**Huella azul:** es el volumen de agua superficial o subterránea evaporada, incorporada en el producto o retornada a otra cuenca o al mar.

**Huella gris:** es el volumen de agua contaminada.

La Figura 19 presenta una distinción de los tipos de uso de agua y de los “colores” de la HA:

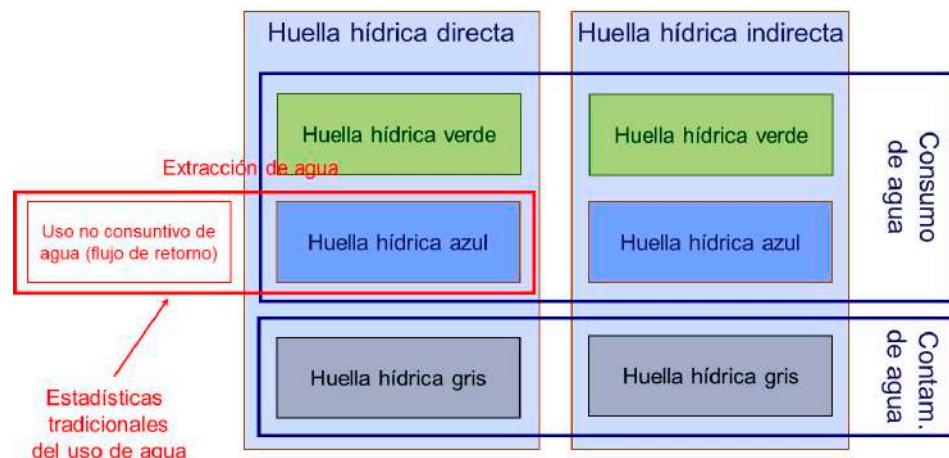


Figura 19. Tipos de uso de agua y “colores” de la HA (Fuente: Adaptado de Hoekstra et al. 2011).

A finales de 2014 se publicó la ISO 14046, referente a la HA, en la que el método de cálculo se desarrolla en modo compatible con el método del ACV. Este indicador ambiental ha ganado en popularidad y, al igual que ha pasado con la Huella de Carbono, se está consolidando como un referente de la sostenibilidad ambiental.

### 10.3.5. CARACTERIZACIÓN

Las categorías de impacto se expresan en indicadores de categoría. La caracterización, por tanto, consiste en el cálculo de los resultados de los indicadores de categoría. Este cálculo se realiza multiplicando el intercambio ambiental (flujo de entrada o salida del ICV) por un factor que representa cuánto contribuye ese intercambio ambiental a un determinado impacto ambiental. Si un determinado consumo o emisión contribuye a más de un impacto ambiental, tendrá un factor de impacto para cada uno de esos impactos. Los métodos más tradicionales de evaluación de impacto en ACV determinan impactos potenciales, es decir, se concentran en la cantidad de sustancias emitidas, sin considerar lugar y momento de la emisión, y se traducen en un impacto potencial a través de factores de caracterización.

Al finalizar la etapa de clasificación y caracterización, se tiene una lista de una decena de impactos, en lugar de centenas que había al finalizar el inventario.

A continuación, se muestra como ejemplo la caracterización para la categoría Calentamiento Global.

La contribución al cambio climático (CC) causado por un proceso se puede estimar efectuando el producto entre la cantidad (m) de cada gas de efecto invernadero (i) emitido por unidad funcional y su Potencial de Calentamiento Global (PCG) (en kg equivalentes de CO<sub>2</sub>) de cada gas (este valor se conoce como factor de caracterización). Finalmente, se suman las contribuciones de cada gas (Ec. 2).

Tabla 4. Categorías de impacto, factores de caracterización y unidad de medida (Adaptado de Huijbregts et al. 2017)

Categoría de impacto	Factor de caracterización	Unidad o sustancia guía
Cambio Climático	Potencial de Calentamiento Global	kg de dióxido de carbono equivalente (CO <sub>2</sub> eq)
Agotamiento del Ozono	Potencial de Agotamiento de Ozono	kg de triclorofluorometano equivalente (CFC <sub>11</sub> eq)
Acidificación Terrestre	Potencial de Acidificación Terrestre	kg de dióxido de azufre equivalente (SO <sub>2</sub> eq)
Toxicidad Humana	Potencial de Toxicidad Humana	kg de 1,4-DCB equivalente (1,4-DCB eq)
Eutrofización de agua dulce	Potencial de Eutrofización	kg de fósforo equivalente (P eq)

La Tabla 4 resume distintas categorías de impacto de punto intermedio, los factores de caracterización y las unidades de medida comúnmente utilizadas:

Categoría de impacto	Factor de caracterización	Unidad o sustancia guía
Cambio Climático	Potencial de Calentamiento Global	kg de dióxido de carbono equivalente (CO <sub>2</sub> eq)
Agotamiento del Ozono	Potencial de Agotamiento de Ozono	kg de triclorofluorometano equivalente (CFC <sub>11</sub> eq)
Acidificación Terrestre	Potencial de Acidificación Terrestre	kg de dióxido de azufre equivalente (SO <sub>2</sub> eq)
Toxicidad Humana	Potencial de Toxicidad Humana	kg de 1,4-DCB equivalente (1,4-DCB eq)
Eutrofización de agua dulce	Potencial de Eutrofización	kg de fósforo equivalente (P eq)

### 10.3.6. NORMALIZACIÓN DE LOS IMPACTOS

Finalizada la fase precedente, se encuentra que los distintos indicadores de punto intermedio presentan unidades de medida distintas. Por lo tanto, si se desea obtener para cada proceso estudiado un perfil sintético apto para ser confrontado con otros perfiles, será necesario normalizar los resultados.

Existen varios parámetros de normalización, muchos de los cuales están ligados a consideraciones artificiosas. A continuación, se presentan algunos ejemplos:

- El método del Centre of Environmental Science (CML - Universidad de Leiden, Holanda), propone transformar los distintos impactos en una “incidencia ambiental” expresada en años, relacionando las emisiones de, por ejemplo, CO<sub>2</sub> del producto analizado, con el volumen anual de emisiones de CO<sub>2</sub>.
- El método de la Universidad de Copenhagen (Dinamarca) propone el concepto de “persona-equivalente”, relacionando el impacto producido por el producto con el impacto de una persona (promedio mundial o nacional).
- El método suizo del Volumen Crítico “Swiss Critical Volume Approach” tiene como base la evaluación de un valor crítico, que puede ser, por ejemplo, el valor límite establecido por ley para los distintos tipos de emisiones en los países donde se realiza el estudio.

- nado “Environmental Priority Strategies”, utiliza una unidad de carga ambiental expresada en términos monetarios y calculada en función de lo que costaría mantener intacta la situación ambiental actual o para restablecer la situación precedente a un efecto determinado, provocado por un proceso o sistema productivo.

Una vez que los impactos han sido normalizados, se obtiene el perfil ambiental del producto o servicio en estudio

### 10.3.7. PONDERACIÓN

La ponderación requiere de juicios de valor sobre la importancia relativa de las categorías de impacto. Sirve para expresar los resultados en un valor único, que permita comparar directamente dos o más productos alternativos a través de un indicador.

Por ejemplo, puede resultar que en la comparación entre dos sistemas uno contribuya mayormente al efecto invernadero, mientras el otro cree mayores riesgos para la salud humana. Resulta necesario, por lo tanto, establecer prioridades entre las categorías de impacto, lo que está relacionado con juicios de valor subjetivos.

Esta fase no se encuentra estandarizada, ya que no existe consenso sobre la metodología y los parámetros a utilizar.

### 10.3.8. LIMITACIONES DE LA ETAPA DE EVALUACIÓN DE IMPACTOS

Los aspectos ambientales que son analizados y reportados en esta fase corresponden solamente a aquellos que han sido identificados en los objetivos del estudio y no constituyen un reporte completo desde el punto de vista ambiental. La fase de evaluación de impactos no predice excedencia de valores límites, ni márgenes de seguridad o riesgos. Por ejemplo, en general los resultados de esta fase no incluyen información espacial, temporal, valores máximos admisibles, ni del tipo dosis-respuesta (excepto en los citados casos de factores dependientes del sitio). Además, se suelen combinar emisiones y actividades realizadas en distintos lugares y momentos, lo que puede disminuir la relevancia de los resultados.

Por otro lado, aunque esta fase se basa en un procedimiento técnico y científico, el uso de valores predefinidos para la selección de categorías de impacto, indicadores y modelos y los procedimientos utilizados para la ponderación o la normalización de resultados pueden ser cuestionables.



## 10.4. FASE 4: EVALUACIÓN E INTERPRETACIÓN

En esta última fase, los hallazgos realizados en las dos fases precedentes se combinan para establecer las conclusiones y recomendaciones del estudio, en modo coherente con los objetivos establecidos al inicio.

En aquellos casos en los que no se ha llevado a cabo la etapa de la evaluación de impactos, la interpretación se basa sólo en los resultados del inventario.

Las etapas de esta fase son las siguientes:

1. Identificación de aspectos significativos basados en los resultados del inventario, de la evaluación de impactos o de ambas.
2. Evaluación, que incluye pruebas de la integridad del estudio, la sensibilidad y la consistencia.
3. Conclusiones, recomendaciones y comunicación de los aspectos relevantes.

El ACV reviste un carácter iterativo, que implica un retorno a etapas previas para corregir cualquier desviación o error que se haya detectado. De este modo, las diferentes etapas se retroalimentan para mejorar los resultados obtenidos.

## 11. EL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA Y LAS HUELLAS COMO HERRAMIENTAS DE GESTIÓN Y COMUNICACIÓN AMBIENTAL

Las compañías, las industrias y las administraciones necesitan herramientas para evaluar y gestionar los impactos ambientales de sus procesos. El ACV en general y las huellas, como la HC o la HA, se enmarcan dentro de las denominadas “herramientas voluntarias de gestión ambiental”, entre las que destacan las ecoetiquetas (ISO 14020 y 14021), los sistemas de gestión ambiental (ISO 14001 y ISO14004), el ACV (ISO 14040 y 14044), entre otros.

La introducción de estas herramientas de gestión ambiental origina algunos beneficios, tales como la disminución de impactos ambientales, consumos de recursos y generación de residuos, y el incremento de la eficiencia en el uso de materiales y energía, lo que conlleva una disminución de costos en el proceso de producción.

Además, la mejora de la sostenibilidad ambiental es una gran herramienta tanto de comunicación como de concientización entre los potenciales consumidores. La aplicación de prácticas ambientalmente sostenibles es una estrategia cada vez más atractiva para las empresas, puesto que generan una opinión pública favorable y contribuyen, en general, a aumentar la rentabilidad. Todo parece indicar que las tendencias en el consumo, las nuevas políticas gubernamentales y el aumento de la competitividad empresarial conducen a la conversión hacia una “industria verde” en los próximos años.

## **PARTE II**

# **APLICACIÓN DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA A MATERIALES Y ESTRATEGIAS DE CONSTRUCCIÓN DE EDIFICIOS**

### **12. EL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA EN EL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN**

La metodología del ACV puede aplicarse directamente al sector de la construcción, para evaluar materiales, productos, componentes, estrategias de edificación y hasta edificios completos y grupos de edificios.

Durante mucho tiempo, los estudios se focalizaron en evaluar la eficiencia energética y las emisiones asociadas a la fase de operación de los edificios. Posteriormente, se dirigieron a evaluar los impactos durante la fase de construcción, para centrarse luego en el estudio de la energía incorporada en las edificaciones.

Una nueva tendencia es la aplicación del ACV a escala de "islas urbanas" o barrios. Esta es una escala operacional típica para proyectos de desarrollo urbano y es un elemento clave en el diseño de eco-viviendas y ciudades inteligentes. De hecho, este cambio de escala responde a la necesidad de diseñar edificios y barrios con mejor desempeño ambiental que los convencionales y de atender al diseño bioclimático. Por ejemplo, considerar en el diseño la orientación de los edificios, la compacidad y la densidad urbana, pueden reducir la demanda de energía para caleamiento y enfriamiento de las viviendas (uno de los mayores contribuyentes del balance de energía de un área urbana).



## 13. ÁREAS PROBLEMÁTICAS ENCONTRADAS PARA LA REALIZACIÓN DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA PARA LAS VIVIENDAS DE INTERÉS SOCIAL

A pesar de que el método del ACV es particularmente apropiado para evaluar las interacciones entre las condiciones de confort interior, el consumo energético del edificio y el impacto sobre el ambiente, los edificios presentan características particulares que hacen desafiante su aplicación. Algunas de estas características son:

- La vida útil de un edificio es muy larga, y difícil de estimar. Esto causa muchas imprecisiones ya que, por ejemplo, las fuentes de energía o la eficiencia energética pueden cambiar en el tiempo, por lo tanto las predicciones iniciales sobre los impactos ambientales están caracterizadas de una importante incertidumbre.
- El diseño y los materiales de un edificio son específicos del sitio, y presentan muchos impactos de carácter local, algo que no es usual en el ACV.
- Los edificios y sus componentes son heterogéneos en su composición, por lo que se requiere gran cantidad de datos, los cuales son escasos o poco confiables.
- Los procesos de fabricación de un mismo material o producto (como un ladrillo) pueden variar mucho de un sitio a otro.
- El ciclo de vida del edificio incluye fases específicas que poseen mayor relevancia relativa que en otros productos. Por ejemplo la fase de uso es preponderante en cuanto a consumos y emisiones (principalmente por la gran duración de su vida útil), y está fuertemente condicionada por el comportamiento de los usuarios.
- El comportamiento de un edificio depende no sólo de su propio diseño, sino también de su entorno: acceso solar, proximidad de otros edificios, proximidad de espacios verdes, existencia de corrientes de aire, isla de calor urbana, arbolado público, etc.

Debido a estas dificultades particulares, existe una serie de estándares específicos para la realización de estudios de ACV de productos de la construcción. Estos estándares definen, entre otras cosas, las bases metodológicas para la redacción de las Reglas de Categorías de Producto (RCP) utilizadas para la confección y publicación de las Declaraciones Ambientales de Producto (DAP) del sector de la construcción.



## 14. ¿CÓMO ADAPTAR Y APLICAR EL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA A LAS VIVIENDAS EFICIENTES?

Para realizar un estudio de ciclo de vida de un producto de la construcción, de una estrategia o de un edificio, es necesario contar con información acerca de la edificación y con herramientas tales como datos de inventario y programas de cálculo, además de haber definido previamente una serie de consideraciones metodológicas como por ejemplo: qué etapas del ciclo de vida se van a considerar o qué categorías de impacto se van a evaluar (Figura 20). Se describe a continuación cada uno de estos aspectos.



Figura 20. Elementos necesarios para aplicar el método del ACV al sector de la construcción

### 14.3.1 INFORMACIÓN ACERCA DEL EDIFICIO

Al momento de aplicar el método del ACV es imprescindible contar con información referida a:

- Tipos y cantidades de materiales y productos involucrados.
- Tipos y cantidades de energía consumida en la etapa de operación.
- Vida útil del edificio completo y de sus productos (de donde surgen los eventuales reemplazos, reparaciones, mantenimiento, etc.).

La hipótesis de duración o periodo de vida útil de una edificación condiciona fuertemente los resultados obtenidos, en la medida en que el ciclo completo incorpora la demanda energética y operaciones de mantenimiento. Para una mayor vida útil estimada, el impacto ambiental asociado a las etapas de uso y mantenimiento incrementará de manera proporcional al impacto generado en cada uno de los años considerados. Sin embargo, la importancia relativa del impacto ambiental asociado a las etapas de producción de materiales y de construcción disminuirá a medida que aumenta la vida útil del edificio.

En términos generales, la mayoría de los estudios disponibles estiman un periodo operacional o de vida útil de 50 años, pero se han encontrado estudios que reducen este periodo a 20 años o lo extienden hasta 100 años.

La vida útil es una de las hipótesis fundamentales del estudio, por lo que se recomienda la realización de un análisis de sensibilidad en relación a este parámetro, para evaluar la variabilidad de los resultados obtenidos.

## 14.3.2 HERRAMIENTAS

### DATOS

La información recopilada acerca del edificio será el sustento para elaborar los datos de inventario referidos a energía y emisiones asociadas a los materiales, a los productos y a la energía demandada.

Siempre que sea posible, los inventarios deben elaborarse con información primaria. Esto corresponde a la información específica del sistema productivo bajo análisis. Por ejemplo, en la producción de un calefón solar utilizado en una determinada región, será necesario recopilar información sobre los materiales y procesos involucrados en la fábrica que los elabora.

En el caso que no se disponga de información sobre la fábrica de estos equipos, puede usarse la información de una fábrica de otra región, siempre que la tecnología de producción sea la misma. Lo mismo ocurre en los casos en que el fabricante no está identificado.

Cuando no se cuente con información primaria (por ejemplo, no hay productores de celdas fotovoltaicas de silicio monocristalino en el país), puede utilizarse información secundaria correspondiente a la misma tecnología de otro país (por ejemplo, celda de silicio monocristalino producida en China).

En estos casos, puede usarse información proveniente de las siguientes fuentes:

## DECLARACIONES AMBIENTALES DE PRODUCTOS ESPECÍFICOS (DAPS).

En Argentina existen pocos productos que poseen una DAP. Estos son (2):

- Acustiver P c/VN 50 mm.
- Acustiver P 50 mm.
- Acustiver R 400 50 mm.
- Andina PVC rústico 20 mm.
- Climaver plus 25 mm.
- Filtro liviano HR 50 mm.
- Filtro tensado Alu HR 50 mm.
- Filtro tensado PP BL HR 50 mm.
- Isoair 38 mm.
- Isocustic Velo Blanco 20 mm.
- Isocustic Velo Negro 20 mm.
- Panel PF 80.
- Rolac Plata Cubierta 50 mm.
- Rolac Plata Muro HR
- Tuyango SG proyectable plaster.

*(2) DAP registradas en el International EPD System, el de mayor actividad en la región Latinoamericana. Existen muchos otros Operadores de Programa (OP), que actúan en otras regiones. Se desconoce si hubieran DAPs de productos argentinos registrados bajo otros OP.*

Esta información podrá utilizarse para productos nacionales cuando sea pertinente.

En el caso de que se utilicen materiales y productos provenientes de otros países, y que estos posean DAPs, puede optarse por usar la información allí reportada.

## BASES DE DATOS DE INVENTARIOS DE CICLO DE VIDA

En el caso de materiales y productos que no cuenten con DAPs, puede utilizarse información proveniente de bases de datos de ciclo de vida, como Ecoinvent, Industry data, European LCD, USLCI, etc.

Ecoinvent contiene datos de diversos sectores, como la generación de electricidad, el transporte, la producción de materiales de construcción, la extracción de minerales, la producción de metales y de productos químicos. Industry data contiene datos recopilados por distintas asociaciones industriales, como Plastics Europe, World Steel y ERASM. European LCD contiene datos de asociaciones empresariales líderes de la Unión Europea. Finalmente, USLCI contiene datos de productos comúnmente utilizados en Estados Unidos, tales como materiales de construcción, combustibles, electricidad y plásticos.

La información secundaria obtenida de bases de datos o DAPs deberá ser adaptada (en la medida de lo posible) a las condiciones de producción nacional o regional, siempre que en el país o en la región se elabore ese mismo producto.

En todos los casos, es imprescindible identificar y registrar la fuente de información utilizada.

## PROGRAMAS DE CÁLCULO

Podrá utilizarse alguno de los programas disponibles aplicables a cualquier sector, ya sea comercial o gratuito, o alguno que haya sido desarrollado específicamente para el sector de la construcción (ver Parte I. Cap. 9).

Es importante recordar que gran parte de la información de las bases de datos contenidas en estos programas responde a condiciones europeas o norteamericanas de producción y/o mercado, por lo cual el uso de las mismas debe hacerse con cautela.

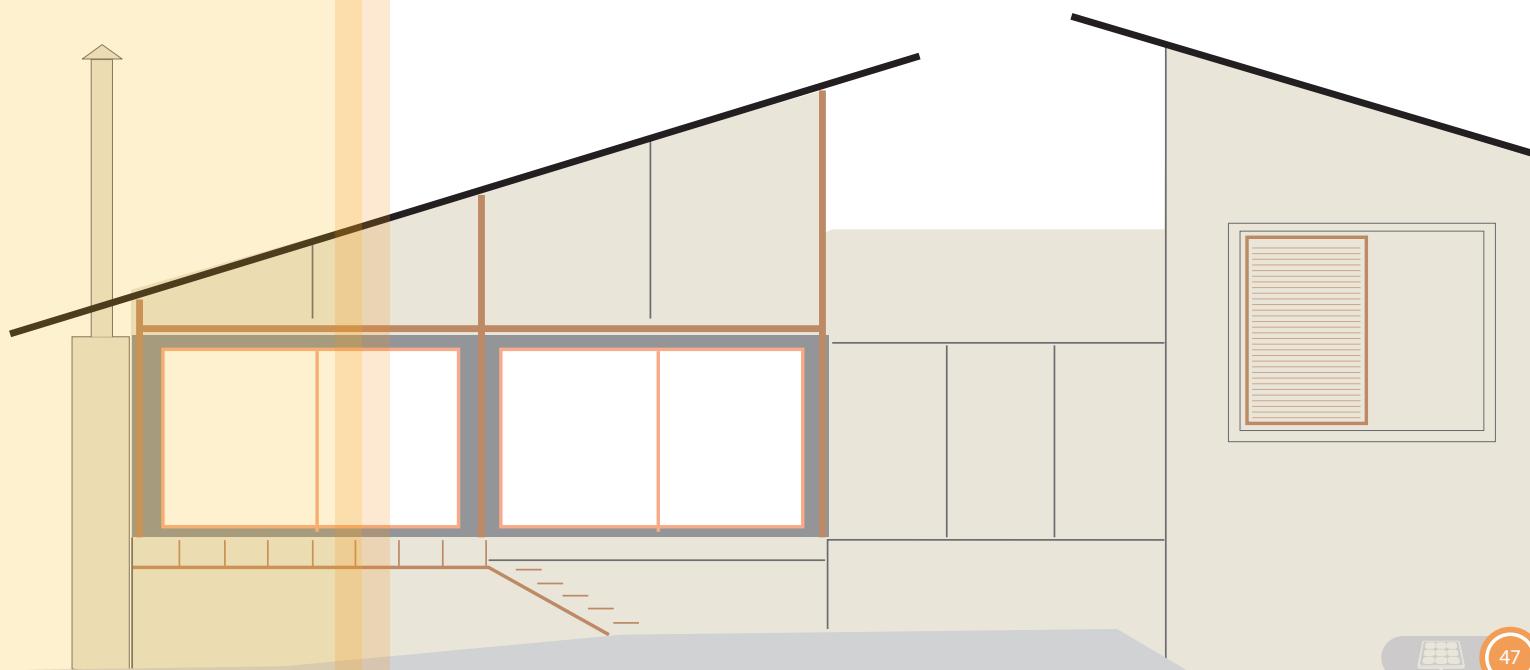


## 14.3.3 CONSIDERACIONES ESPECÍFICAS SOBRE EL ACV

### UNIDAD FUNCIONAL

Abordar un estudio de ACV utilizando como referencia el ciclo de vida completo de la edificación como si fuese un “producto” de la construcción, puede representar un riesgo metodológico importante, dada la complejidad de los elementos involucrados (Carballal 2012). Para evitar este problema, es conveniente estratificar el producto de la construcción en diferentes niveles que pueden ser objeto de análisis (materiales, componentes, etc.), estableciendo para cada nivel una unidad funcional acorde a su función principal. Por ejemplo, para un material aislante la unidad funcional puede definirse en base a la resistencia térmica (expresada en m<sup>2</sup>K/W). Esta referencia permite calcular la cantidad de material necesaria para alcanzar determinado grado de aislamiento, haciendo posible asociar a esta cantidad los impactos ambientales generados durante la fase de producción. El Consejo Europeo de Fabricantes de Materiales de la Construcción (CEPMC, en inglés Council of European Producers of Materials for Construction) ha establecido como referencia para el cálculo de la unidad funcional de materiales aislantes un valor de resistencia térmica equivalente a 1 m<sup>2</sup>K/W, indicando como recomendable un periodo de 50 años para la evaluación de la fase de uso de la edificación (CEPMC, 2000). Estas consideraciones han sido posteriormente contempladas en el establecimiento de los criterios de ecoetiquetado europeo para materiales aislantes, así como en numerosos estudios de ACV de este tipo de materiales.

Es importante notar que un estudio de ACV de un material de construcción o componente no contempla adecuadamente muchas de las funciones que proporciona el edificio, por ejemplo, el acondicionamiento térmico. Por tanto, las decisiones basadas en los resultados aislados de ACV de materiales o componentes pueden resultar erróneas desde el punto de vista global de la edificación.



## ETAPAS DEL CICLO DE VIDA A INCLUIR

Una evaluación del ciclo de vida de materiales, productos de la construcción o de edificios normalmente involucra evaluar su ciclo de vida completo. Esto significa incluir todas las etapas en la evaluación: suministro de materia prima, fabricación de productos de construcción, proceso de construcción, uso, demolición y disposición final, reciclaje, reuso, etc.

Como regla general, puede adoptarse el enfoque establecido en las normas europeas EN15978 y EN15804, ya que es útil para la provisión de los datos y la expresión de los resultados.

Ambas normas acuden al principio de modularidad, el cual establece a qué etapa del ciclo de vida se deben asignar los impactos producidos, y adoptan el principio "quien contamina paga", asignando el impacto producido (o el beneficio ambiental obtenido) a la etapa en la que aparecen.

Este enfoque estructura el ciclo de vida del edificio en etapas que integran módulos de información (Figura 21):

Etapa del producto (A1-A3);

Etapa del proceso de construcción (A4-A5);

Etapa de uso (B1-B7);

Etapa de fin de vida (C1-C4);

Etapa de beneficios y cargas más allá del límite del sistema (D).



Figura 21: Etapas y módulos de información para la evaluación de edificios a partir de las etapas de su ciclo de vida (Fuente: Carballal 2012).

La etapa del producto considera los siguientes procesos:

**A1:** extracción y procesamiento de materia prima, y procesamiento de entrada de material secundario (por ejemplo, procesos de reciclaje).

**A2:** transporte hasta el fabricante.

**A3:** fabricación de productos (materiales).

Incluye la provisión de todos los materiales, productos y energía, el procesamiento de envases y su transporte, así como el procesamiento de residuos hasta el final del desecho o la eliminación de los residuos finales que ocurren durante esta etapa.

La etapa del proceso de construcción considera lo siguiente:

**A4:** transporte hasta el sitio de construcción.

**A5:** instalación en el edificio.

Incluye el suministro de todos los materiales, productos y energía, así como el procesamiento o la eliminación de residuos generados durante el proceso de construcción.

La etapa de uso relacionada con la estructura del edificio considera lo siguiente:

**B1:** uso o aplicación del producto instalado.

**B2:** mantenimiento.

**B3:** reparación.

**B4:** reemplazo.

**B5:** renovación.

Incluye la provisión y el transporte de todos los materiales, productos y el uso relacionado de energía y agua, así como el procesamiento y disposición final de los residuos generados durante esta etapa.

La etapa de uso relacionada con la operación del edificio incluye lo siguiente:

**B6:** uso de energía operacional (por ejemplo, operación del sistema de calefacción y otros servicios).

**B7:** uso operacional del agua (por ejemplo, en el caso de estrategias evaporativas de enfriamiento).

Estos módulos de información incluyen la provisión y el transporte de todos los materiales, productos, así como el uso de energía y agua, y el procesamiento de los residuos generados durante esta fase hasta su disposición final.

La etapa del final de la vida incluye:

**C1:** de-construcción, demolición.

**C2:** transporte de desechos.

**C3:** procesamiento de residuos para su reutilización, recuperación y/o reciclaje.

**C4:** disposición final, incluidos todos los procesos y los transportes, la provisión de todos los materiales y productos necesarios y el uso asociado de energía y agua.

El Módulo D incluye potenciales de reutilización, recuperación y/o reciclaje de materiales y componentes.

Las dos primeras etapas (del producto y de proceso) suelen ser las más conocidas, a pesar de que en la práctica obtener datos suficientes para los cálculos puede ser problemático. A menudo, las siguientes tres etapas se analizan sobre la base de escenarios, lo que significa que deberán hacerse suposiciones acerca de cómo se usará y mantendrá el edificio y cuál será su destino al final de su vida útil.

Muchas de las etapas se calculan una vez definida una serie de circunstancias tales como: sitio de emplazamiento del edificio, localización de proveedores, generación (tipo y cantidad) de residuos por etapa, ubicación del sitio de disposición final, tipo de tratamiento final de residuos, etc.

En general, los estudios realizados en fase de proyecto no incluyen todas las etapas, ya que se carece de información relativa a muchos procesos (por ejemplo, cuántos residuos se generan al construir un muro de ladrillo cerámico, o al colocar un aislante, o al pintar un cielorraso), por lo tanto, en primera instancia se referirán solamente a las etapas A y B. Luego, en función del detalle de la información que provean los actores involucrados en el proyecto, se podrán considerar más sub-etapas dentro de estas dos etapas principales. Por ejemplo, si en lugar de proveer información acerca de la cantidad de material que constituye un elemento (por ejemplo, m<sup>2</sup> de mampostería), se incluye además la cantidad de material adquirida para constituirlo, se podrá evaluar la generación de residuos. Esto es importante cuando se desean comparar tecnologías muy diferentes, como por ejemplo un muro de mampostería tradicional con sistemas de construcción en seco (tipo Steel framing) dado que uno de los sistemas produce una cantidad muy superior de residuos que el otro.



## INDICADORES Y CATEGORÍAS AMBIENTALES A CONSIDERAR

Tal como ocurre en otras áreas, las emisiones de gases de efecto invernadero (y por tanto, la categoría de impacto Potencial de calentamiento global) es uno de los aspectos ambientales más explorados en los estudios de ACV de edificaciones.

Sin embargo, abordar un abanico más amplio de aspectos ambientales y categorías de impacto, incluyendo por ejemplo el consumo de agua, la producción de residuos, el agotamiento de recursos abióticos, la acidificación, la eutrofización, etc., resulta de gran relevancia ya que pueden darse situaciones en las que se consigue reducir la magnitud del impacto para una categoría en particular y, simultáneamente, incrementar la magnitud del impacto en otras categorías. Por otra parte, este abordaje es consistente con las exigencias de las Declaraciones Ambientales de Producto.

En muchos casos, también resulta de interés evaluar parámetros sobre el uso de recursos energéticos y materiales, como son:

Uso de energía primaria renovable excluyendo los recursos de energía primaria renovable utilizada como materia prima.

Uso de energía primaria renovable utilizada como materia prima.

Uso total de la energía primaria renovable (energía primaria y recursos de energía primaria renovable utilizada como materia prima).

Uso de energía primaria no renovable, excluyendo los recursos de energía primaria no renovable utilizada como materia prima.

Uso de la energía primaria no renovable utilizada como materia prima.

Uso total de la energía primaria no renovable (energía primaria y recursos de energía primaria renovable utilizada como materia prima).

Uso de combustibles secundarios renovables.

Uso de combustibles secundarios no renovables.

Uso de materiales secundarios.

Uso neto de recursos de agua dulce.

En todos los casos, las categorías de impacto y los parámetros sobre el uso de recursos podrán ser evaluados sólo si la información de base con la que se cuenta contiene datos que lo permitan.

## NORMATIVA DE REFERENCIA

Para la aplicación del método del ACV al sector de la construcción podrán seguirse los requisitos, directrices, principios y marco de referencia establecidos por las ISO 14040:2006 y 14044:2006 (ver Parte I. Cap. 5).

Adicionalmente, podrán utilizarse como referencia cuando sea necesario los siguientes estándares internacionales:

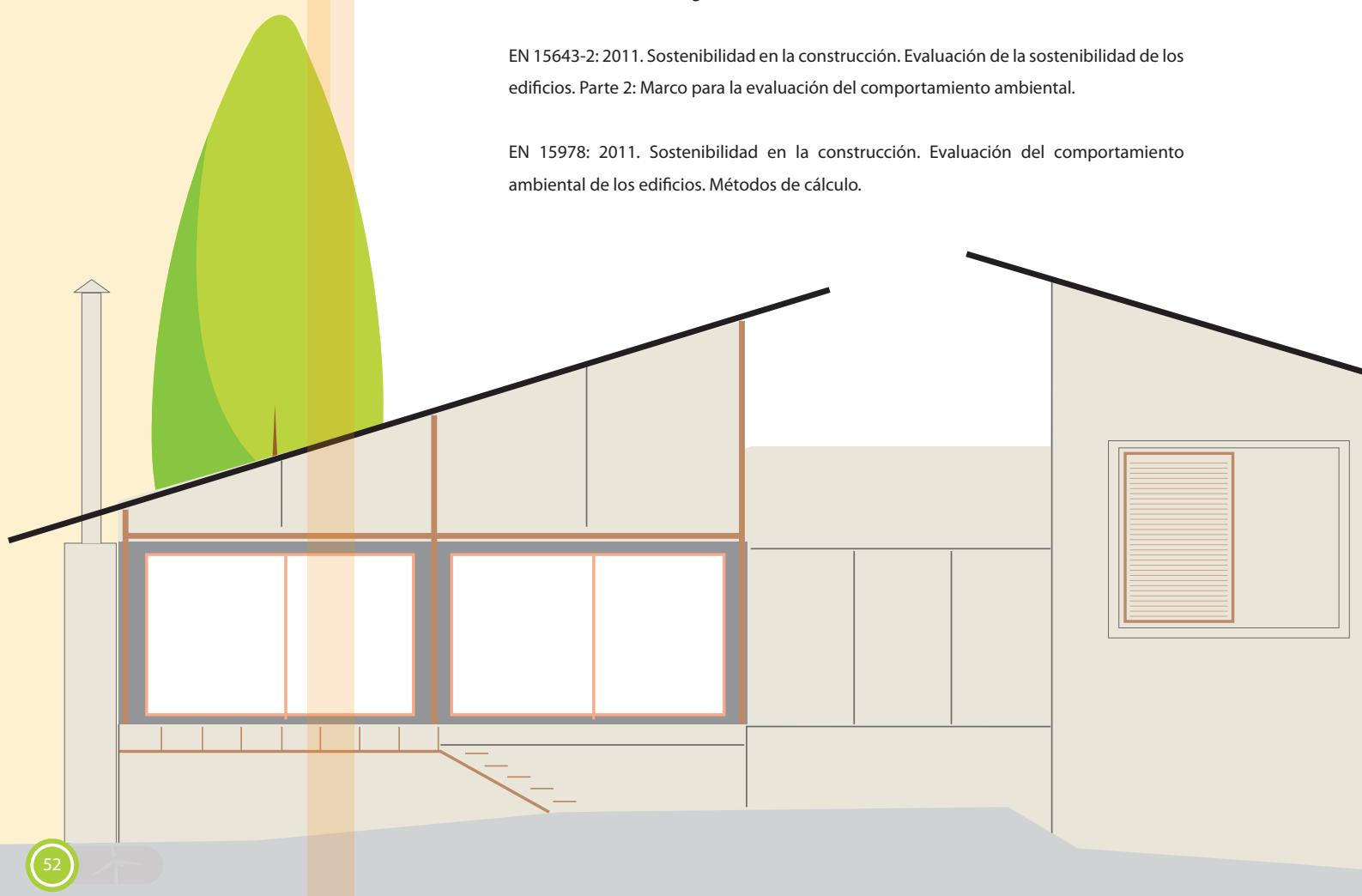
ISO 14025:2006. Etiquetas y declaraciones ambientales. Declaraciones ambientales tipo III. Principios y procedimientos.

EN 15804:2012+A1:2014. Sostenibilidad en la construcción. Declaraciones ambientales de producto. Reglas de categoría de producto básicas para productos de construcción.

EN 15643-1:2012. Sostenibilidad en la construcción. Evaluación de la sostenibilidad de los edificios. Parte 1: Marco general.

EN 15643-2: 2011. Sostenibilidad en la construcción. Evaluación de la sostenibilidad de los edificios. Parte 2: Marco para la evaluación del comportamiento ambiental.

EN 15978: 2011. Sostenibilidad en la construcción. Evaluación del comportamiento ambiental de los edificios. Métodos de cálculo.



## 13. ¿DÓNDE SE PUEDE OBTENER MÁS INFORMACIÓN?

Existe un enorme número de sitios que contienen información sobre la metodología, el concepto y el pensamiento de ciclo de vida. El siguiente es un listado muy limitado que se presenta para brindar más información:

[www.lifecycleinitiative.org](http://www.lifecycleinitiative.org)

[www.setac.org](http://www.setac.org)

[www.rediberoamericanadeciclodvida.wordpress.com](http://www.rediberoamericanadeciclodvida.wordpress.com)

[www.eiolca.net](http://www.eiolca.net)

[www.spold.org](http://www.spold.org)

[www.doka.ch](http://www.doka.ch)

[www.lcacenter.org](http://www.lcacenter.org)

[www.athenasmi.org](http://www.athenasmi.org)

## REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA DE INTERÉS

Agencia Danesa de Transporte y Construcción. Introduction to LCA of Buildings. En: [https://www.trafikstyrelsen.dk/~media/Dokumenter/09%20Byggeri/Baredygtigt%20byggeri/TBST-2016-02-Introduction\\_LCA\\_english.pdf](https://www.trafikstyrelsen.dk/~media/Dokumenter/09%20Byggeri/Baredygtigt%20byggeri/TBST-2016-02-Introduction_LCA_english.pdf). Acceso: julio de 2019.

Anand, C. K. y Amor, B. (2017). Recent developments, future challenges and new research directions in LCA of buildings: A critical review. Renewable and sustainable energy reviews, 67, 408-416.

Arena, A.P. (2006). Impactos ambientales de las construcciones e infraestructuras urbanas durante el ciclo de vida. Jornadas de Urbanismo "Piensa urbana Mendoza". 10-11 de noviembre de 2006. Mendoza.

Badino, V., Baldo, G.L. (1998). LCA. Istruzioni per l'uso. Progetto Leonardo. Bologna.

Bare, J. C., Pennington, D. W. y de Haes, H. A. U. (1999). Life cycle impact assessment sophistication. The International Journal of Life Cycle Assessment, 4(5), 299.

Barrios Martinez, S. (2015). Lluvia ácida. En: <https://quimicageneralylaboratorio.wordpress.com/2015/11/05/lluvia-acida-5/>. Acceso: julio de 2019.

Beck, T., Bos, U., Wittstock, B., Baitz, M., Ficher, M. y Sedlbauer, K. (2011). Land Use Indicator Value Calculation in Life Cycle Assessment (LANCA) - Method Report. Fraunhofer IBP, Stuttgart.

Benveniste, G., Gazulla, C., Fullana, P., Celades, I., Ros, T., Zaera, V., & Godes, B. (2011). Análisis de ciclo de vida y reglas de categoría de producto en la construcción. El caso de las baldosas cerámicas. Informes de la Construcción, 63(522), 71-81.

Carballal, B.R. (2012). Propuesta metodológica de aplicación sectorial de Análisis de ciclo de vida (ACV) para la evaluación ambiental de la edificación en España. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, España.

Cardim de Carvalho Filho, A. (2001). Análisis del ciclo de vida de productos derivados del cemento-Aportaciones al análisis de los inventarios del ciclo de vida del cemento. Universitat Politècnica de Catalunya.

CEPMC (2000). Guidance for the provision of environmental information on construction products. Council for European Producers of Materials for Construction, Bruselas.

Civit, B. y Arena, A.P. (2006). Towards the identification and calculation of characterization factors for land use in western Argentina. In Expert Workshop: Definition of best indicators for land use impacts in life cycle assessment. Guildford, UK: University of Surrey (pp. 12-13).



Erlandsson, M., Levin, P. y Myhre, L. (1997). Energy and environmental consequences of an additional wall insulation of a dwelling. *Building and environment*, 32(2), 129-136.

Evon, B., Payet, J., Blanc, I., Beloin-Saint-Pierre, D., Raison, E., Adra, N., & Durand, Y. (2013). Methodological Framework for Assessing the Environmental Impacts of Photovoltaics Systems Using the LCA Method. In 6th International Conference on Life Cycle Management (pp. 4-pages).

Finnveden, G. (1996). Part III: Resources and related impact categories. In: Udo de Haes (ed). Towards a methodology for life cycle impact assessment. SETAC-Europe. Brussels.

Fornaro M., (1998). Elementi per la valutazione dell'impatto ambientale di un sistema edilizio, Tesi di Laurea, Politecnico di Torino, Facoltà di Architettura.

Fthenakis, V.M., Kim, H.C., Frischknecht, R., Raugei, M., Sinha, P., Stucki, M. (2011). Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems, New York, United States.

García-Pérez, S., Sierra-Pérez, J. y Boschmonart-Rives, J. (2018). Environmental assessment at the urban level combining LCA-GIS methodologies: A case study of energy retrofits in the Barcelona metropolitan area. *Building and Environment*, 134, 191-204.

Guan, J., Zhang, Z. y Chu, C. (2016). Quantification of building embodied energy in China using an input-output-based hybrid LCA model. *Energy and Buildings*, 110, 443-452.

Häfliger, I. F., John, V., Passer, A., Lasvaux, S., Hoxha, E., Saade, M. R. M. y Habert, G. (2017). Buildings environmental impacts' sensitivity related to LCA modelling choices of construction materials. *Journal of cleaner production*, 156, 805-816.

Hoekstra, A. Y. (2003). Virtual water trade: proceedings of the international expert meeting on virtual water trade, Delft, The Netherlands, 12-13 December 2002, Value of Water Research Report Series No. 12.

Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Mekonnen, M. M. y Aldaya, M. M. (2011). The water footprint assessment manual: Setting the global standard. Routledge.

Hoxha, E., Habert, G., Lasvaux, S., Chevalier, J. y Le Roy, R. (2017). Influence of construction material uncertainties on residential building LCA reliability. *Journal of cleaner production*, 144, 33-47.

Huijbregts, M. A., Steinmann, Z. J., Elshout, P. M., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., ... y van Zelm, R. (2017). ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(2),

138-147.

IK Ingeniería. (2019). En: <https://www.ik-ingeneria.com/es/analisis-ciclo-vida-acv>. Acceso: julio de 2019.

ISO. (2006). International Standard 14040. Life Cycle Assessment. Requirements and guidelines. International Organization for Standardization. Geneva.

ISO. (2006). International Standard 14044. Environmental Management-Life Cycle Assessment-Requirements and guidelines. International Organization for Standardization. Geneva.

ISO. (2014). International Standard 14046. Environmental Management-Water footprint-Principles, requirements and guidelines. International Organization for Standardization. Geneva.

Kaufman Wind Energy (s.f.). Life Cycle Assessment for Industrial Sized Vestas Wind Turbine. En: <https://sites.google.com/site/kaufmanwindenergy/life-cicle-analysis-and-return-on-investment>. Acceso: julio de 2019.

Lasvaux, S., Habert, G., Peuportier, B. y Chevalier, J. (2015). Comparison of generic and product-specific Life Cycle Assessment databases: application to construction materials used in building LCA studies. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(11), 1473-1490.

Lausselet, C., Borgnes, V. y Brattebø, H. (2019). LCA modelling for Zero Emission Neighbourhoods in early stage planning. *Building and Environment*, 149, 379-389.

Lotteau, M., Loubet, P., Pousse, M., Dufrasnes, E. y Sonnemann, G. (2015). Critical review of life cycle assessment (LCA) for the built environment at the neighborhood scale. *Building and Environment*, 93, 165-178.

Martinez, E., Sanz, F., Pellegrini, S., Jimenez, E., Blanco, J. (2009a) Life cycle assessment of a multimegawatt wind turbine. *Renew Energy* 34(3):667-673.

Martinez, E., Sanz, F., Pellegrini, S., Jimenez, E., Blanco, J. (2009b) Life-cycle assessment of a 2-MW rated power wind turbine: CML method. *Int J Life Cycle Assess* 14(1):52-63.

Martínez-Rocamora, A., Solís-Guzmán, J. y Marrero, M. (2016). LCA databases focused on construction materials: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 565-573.

Meijer, A., et al. (2003). Life-cycle assessment of photovoltaic modules: Comparison of mc-Si, InGaP and InGaP/mc-si solar modules. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 11(4): p. 275-287.

Meex, E., Hollberg, A., Knapen, E., Hildebrand, L. y Verbeeck, G. (2018). Requirements for applying LCA-based environmental impact assessment tools in the early stages of building design. *Building and Environment*, 133, 228-236.

Milà i Canals, L., Clift, R., Basson, L., Hansen, Y. y Brandão, M. Con contribuciones de Arena, A., Bauer, C., Cederberg, C., Gardner, J., Kinuthia, W., Kløverpris, J., Kosmas, C., Lesage, P., Lynch, J., Michelsen, O., Müller-Wenk, R., Romanyà, J., Rosado, A., Rydgren, B., Schenck, R., Schepers, J., Treweek, J., Valdivia, S., van der Werf, H. y Vanguelova, E. (2006). State-of-the-Art: Land Use in LCA. Expert Workshop on Land Use Impacts in Life Cycle Assessment (LCA). *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 11 (5) 363 - 368.

Nemecek, T., Schnetzer, J. y Reinhard, J. (2016). Updated and harmonised greenhouse gas emissions for crop inventories. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(9), 1361-1378.

Pacca S., Sivaraman D., Keoleian G.A. (2007). Parameters affecting the life cycle performance of PV technologies and systems. *Energy Policy* 35(6):3316–3326.

Palacios-Munoz, B., Peuportier, B., Gracia-Villa, L. y López-Mesa, B. (2019). Sustainability assessment of refurbishment vs. new constructions by means of LCA and durability-based estimations of buildings lifespans: A new approach. *Building and Environment*, 106203.

Petrovic, B., Myhren, J. A., Zhang, X., Wallhagen, M. y Eriksson, O. (2019). Life Cycle Assessment of Building Materials for a Single-family House in Sweden. *Energy Procedia*, 158, 3547-3552.

Revista Cero Grados. (s.f.). En: <https://0grados.com.mx/destruccion-del-ozono/a0cg0003962/>. Acceso: julio de 2019.

Rosselló Batle, B. (2019). Análisis de la energía consumida y las emisiones de CO<sub>2</sub> durante el ciclo de vida de edificios del sector terciario y residencial situados en las Islas Baleares.

Roux, C., Schalbart, P., Assoumou, E. y Peuportier, B. (2016). Integrating climate change and energy mix scenarios in LCA of buildings and districts. *Applied energy*, 184, 619-629.

