

PROYECTO MEJORA DE LAS ECONOMÍAS  
REGIONALES Y DESARROLLO LOCAL

—  
GUÍAS  
METODOLÓGICAS:  
**ANÁLISIS DE  
CICLO DE VIDA Y  
HUELLA HÍDRICA**

CUADERNO TECNOLÓGICO N°32

Autores:

**Joan Colón Jordà  
Alejandro Pablo Arena**

Octubre de 2016



Unión Europea

PROYECTO MEJORA DE LAS ECONOMÍAS  
REGIONALES Y DESARROLLO LOCAL



Unión Europea

Delegación de la Comisión Europea en Argentina  
Ayacucho 1537  
Ciudad de Buenos Aires  
Teléfono (54-11) 4805-3759  
Fax (54-11) 4801-1594



INTI



Instituto Nacional de Tecnología Industrial  
Gerencia de Cooperación Económica e Institucional  
Avenida General Paz 5445 - Edificio 2 oficina 212  
Teléfono (54 11) 4724 6253 | 6490  
Fax (54 11) 4752 5919

[www.ue-inti.gob.ar](http://www.ue-inti.gob.ar)

CONTACTO

Información y Visibilidad: Lic. Gabriela Sánchez  
gabriela@inti.gob.ar

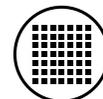
—  
GUÍAS  
METODOLÓGICAS:  
ANÁLISIS DE  
CICLO DE VIDA Y  
HUELLA HÍDRICA

CUADERNO TECNOLÓGICO N° 32

Autores:

**Joan Colón Jordà**  
**Alejandro Pablo Arena**

Octubre de 2016



INTI



Unión Europea

## INDICE

<b>1. ABREVIATURAS .....</b>	<b>4</b>
<b>2. PRESENTACIÓN .....</b>	<b>6</b>
<b>3. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>8</b>
<b>4. SECCIÓN 1 / INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA.....</b>	<b>10</b>
<b>4.1 La definición del sistema y sus límites .....</b>	<b>10</b>
<b>4.2 Identificación de funciones.....</b>	<b>10</b>
<b>4.3 Selección de la unidad funcional.....</b>	<b>10</b>
<b>4.4 Identificación del rendimiento del producto y del flujo de referencia .....</b>	<b>11</b>
Comparación de productos	
<b>4.5 Definición de las entradas y salidas del sistema.....</b>	<b>11</b>
4.5.1 Determinación los procesos unitarios del producto del sistema	
4.5.2 Recolección inicial de datos para cada proceso unitario	
4.5.3 Aplicación de reglas de decisión	
4.5.4 La asignación de cargas	
<b>4.6 Limitaciones del inventario .....</b>	<b>11</b>
<b>4.7 Definición y clasificación de categorías .....</b>	<b>12</b>
<b>4.8 Caracterización.....</b>	<b>13</b>
<b>4.9 Normalización de los impactos.....</b>	<b>14</b>
<b>4.10 Ponderación.....</b>	<b>15</b>
<b>4.11 Limitaciones de la etapa de evaluación de impactos .....</b>	<b>15</b>
<b>5. SECCIÓN 2 / INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS DE LA HUELLA HÍDRICA .....</b>	<b>30</b>
<b>5.1 Definiciones importantes.....</b>	<b>30</b>
<b>5.2 El agua a nivel mundial .....</b>	<b>31</b>
5.2.1 El ciclo del agua	
5.2.2 La problemática del agua	
<b>5.3 El agua en Argentina .....</b>	<b>34</b>
<b>5.4 Introducción a la huella hídrica .....</b>	<b>35</b>
5.4.1 Objetivo del estudio	
5.4.2 El balance de agua	
<b>5.5 Metodologías de cálculo de la huella hídrica.....</b>	<b>39</b>
5.5.1 La huella hídrica según la Water Footprint Network	
5.5.2 La huella hídrica según el marco de referencia del ACV (ISO 14046)	

<b>6. SECCIÓN 3 / CONSIDERACIONES FINALES.....</b>	<b>47</b>
<b>6.1 El ACV y la huella hídrica como herramientas de gestión y comunicación ambiental .....</b>	<b>47</b>
<b>6.2 ¿Dónde se puede obtener más información?.....</b>	<b>47</b>
6.2.1 Análisis del Ciclo de Vida	
6.2.2 Huella Hídrica	
<b>7. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.....</b>	<b>49</b>
<b>7.1 Análisis del Ciclo de Vida .....</b>	<b>49</b>
<b>7.2 Huella Hídrica .....</b>	<b>53</b>

## 1. ABREVIATURAS

<b>ACV</b>	Análisis del Ciclo de Vida
<b>ICV</b>	Inventario de Ciclo de Vida
<b>EIACV</b>	Evaluación de Impactos en el Análisis de Ciclo de Vida
<b>HH</b>	Huella Hídrica
<b>HC</b>	Huella de Carbono
<b>WSI</b>	Índice de estrés hídrico
<b>SETAC</b>	Society of Environmental Toxicology and Chemistry
<b>ISO</b>	International Standards Organization
<b>IPCC</b>	Panel Intergubernamental de Cambio Climático
<b>LCA</b>	Life Cycle Analysis (Análisis del Ciclo de Vida por sus siglas en inglés)
<b>ODP</b>	Potencial de adelgazamiento de la capa de ozono (sigla en inglés)
<b>Midpoint</b>	Punto intermedio
<b>Endpoint</b>	Punto final
<b>WFN</b>	Water Footprint Network
<b>WULCA</b>	Water Use in LCA

## 2. PRESENTACIÓN

La Unión Europea y el INTI firmaron un convenio de financiación destinado a mejorar la competitividad de las miPyMEs del norte argentino acercando respuestas tecnológicas apropiadas al nuevo entorno productivo industrial. Los responsables de la ejecución del Proyecto "Mejora de las Economías Regionales y Desarrollo Local" son el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), en representación del gobierno nacional, y la Delegación de la Unión Europea en Argentina.

Durante más de medio siglo, el INTI ha construido capacidades profesionales e infraestructura tecnológica de relevancia que lo posicionan hoy como actor importante para aportar innovación tecnológica aplicada a los procesos productivos de toda la economía y para el desarrollo de soluciones industriales que incrementen la productividad y la competitividad de la industria nacional.

Con la ejecución de este proyecto se buscó acercar la tecnología y las capacidades técnicas a las regiones de menor desarrollo relativo del país, poniendo a disposición de las miPyMEs y Pymes los medios para satisfacer las demandas de mejora de eficiencia y calidad de sus productos y/o servicios para dar un salto cualitativo en cada una de las provincias del NOA y NEA.

Por tanto, a través de un diagnóstico y evaluación de necesidades tecnológicas hecho en articulación con los gobiernos provinciales, se diseñó un plan de acción sectorial que se implementó hasta el 2016, en cinco sectores industriales determinados como prioritarios: industrialización de alimentos, curtiembre, textil, y metalmecánica junto a la gestión medioambiental como eje transversal a los sectores industriales anteriores.

El proyecto Mejora de las Economías Regionales y Desarrollo Local surgió como parte de las acciones de vinculación internacional del INTI, en donde la cooperación técnica con organismos públicos y privados del mundo -presentes en el campo tecnológico- favorecen el intercambio de conocimientos como elemento fundamental para el desarrollo industrial local.

En esa dirección, uno de los componentes de este proyecto fue la convocatoria de especialistas en diversas temáticas, para cumplir con misiones de trabajo en nuestro país. El objetivo de cada misión fue brindar capacitaciones específicas a técnicos de las provincias norteñas, de acuerdo a la especialidad de cada experto, a grupos de trabajo de Centros Regionales de Investigación y Desarrollo así como a Unidades Operativas que conforman la red INTI, y brindar asistencia técnica a las miPyMEs que acompañen el desarrollo de las actividades del proyecto. Además, mantuvieron entrevistas con actores locales quienes constituyen un recurso esencial y estratégico para alcanzar los objetivos planteados.

La publicación que se dispone a conocer ha sido concebida como resultado de una misión técnica de uno de los expertos intervinientes en este proyecto. Cada experto al finalizar su trabajo en el país, elaboró un informe técnico con recomendaciones para el fortalecimiento del sector para el cual fue convocado y que dio lugar a la presente producción, editada con el propósito de divulgar los conocimientos a partir de las necesidades

detectadas y los resultados del intercambio efectivo hecho en territorio, conjugando los basamentos teóricos con la realidad local.

### **Dra. Graciela Muset**

Directora del Proyecto Mejora de las Economías Regionales y Desarrollo Local

El contenido de esta publicación es responsabilidad exclusiva del consorcio EPTISA-AENOR-ATECOR-UPM y en ningún caso debe considerarse que refleja los puntos de vista de la Unión Europea.

### 3. INTRODUCCIÓN

La preocupación mundial por el cambio climático, asociada a las evidencias científicas sobre su existencia, y a 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 la más específica para la categoría ambiental del cambio climático. La Huella de Carbono cuantifica la cantidad total de emisiones de gases que contribuyen al 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 es necesario atender. 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 (Life Cycle Analysis o Life Cycle Assessment - LCA, en la literatura anglosajona) permite considerar todos los atributos ambientales relacionados con la naturaleza, la salud humana, y los recursos, con una óptica que difiere de las clásicas en que analiza un sistema considerando todos los consumos y emisiones que ocurren en los distintos momentos de su vida útil, a saber:

- la fabricación, considerando desde que se extraen las materias primas del ambiente, se procesan, se transportan, se elabora un producto, se distribuye al mercado;
- la utilización y el mantenimiento;
- el desmantelamiento y el tratamiento de los residuos al final de la vida útil, lo 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 basurales, etc.

El análisis de ciclo de vida puede entonces definirse como un procedimiento sistemático, objetivo, 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).

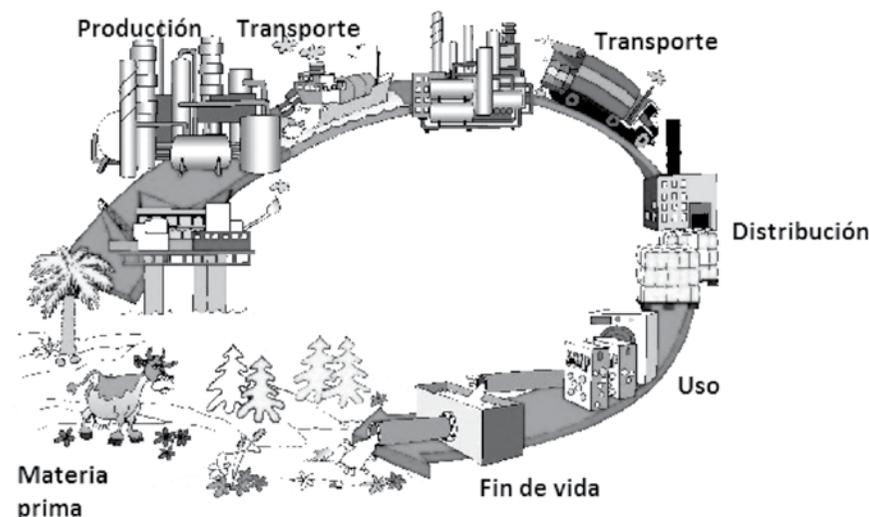


Figura 1. Cadena de producción, uso y fin de vida de un producto

El análisis de ciclo de vida permite analizar los potenciales impactos ambientales de un gran número de indicadores. El más conocido de ellos es, sin duda, la "Huella de Carbono". Sin embargo, la "Huella Hídrica" es otro indicador ambiental incluido dentro del ACV que ha despertado un gran interés entre la comunidad científica en los últimos tiempos. La Huella Hídrica se define como:

"La(s) medida(s) que cuantifican los potenciales impactos ambientales relacionados con el agua de productos, procesos u organizaciones"

A finales de 2014 se publicó la ISO 14046 referente a la Huella Hídrica y se espera que en los próximos años este indicador ambiental gane en popularidad y, al igual que ha pasado con la Huella de Carbono, se consolide como un referente de la sostenibilidad ambiental.

## 4. SECCIÓN 1 / INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA

### 4.1 ¿PARA QUÉ SIRVE UN ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA?

Es usual que los consumidores quieran conocer cuál es el producto menos nocivo, por ejemplo, si utilizar bolsas plásticas de polietileno o bolsas de papel, o una botella de PET o una de vidrio descartable, u otra retornable; o los pañuelos descartables de papel o 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 de madera de una plantación, o de residuos forestales, o de papel reciclado, y 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", puede contestar estas preguntas. Pero su utilidad será mucho mayor: permitirá al productor definir estrategias para mejorar el desempeño ambiental de su producto, ya que conoce 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 al decisor político para impulsar compras de uno u otro tipo de bolsas.

### 4.2 EJEMPLOS DE APLICACIONES EN EL SECTOR AGROINDUSTRIAL

Existen muchísimas publicaciones sobre aplicación de análisis de ciclo de vida a productos del sector agroindustrial, que involucran distintos procesos, sectores y países. A modo de ejemplo se citan los trabajos de *Poritosh Roy et al (2009)*, *Pérez Gutiérrez, Francisco Alberto (2013)*, *F Brentrup et al (2001)*, *Annika Carlsson-Kanyama (1998)*, *Johanna Berlin (2002)*, *Daesoo Kim et al (2013)*, *Christel Cederberga et al (2000)*, *Thomas Nemecek et al (2011)*, *Dolle J.B. et al (2009)*.

### 4.3 ¿CÓMO SE INICIA UN ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA?

Usualmente 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 (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 en general alguien externo a la empresa, 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 de la empresa.

### 4.4 ¿QUÉ APLICACIONES TIENE EL 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:

1. Desarrollo y mejora de productos
2. Planificación estratégica
3. Desarrollo de políticas públicas
4. Declaraciones ambientales de productos
5. Marketing

### 4.5 ¿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 trascendentes, evitando realizar otras que sean poco efectivas o aún 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

### 4.6 ¿QUÉ NORMAS INTERNACIONALES SE APLICAN?

La complejidad de un estudio con un alcance tan amplio como el del Análisis de Ciclo de Vida, y la necesidad de obtener resultados objetivos han determinado que la normativa internacional haya trabajado activamente para lograr la estandarización de la metodología, lo que ayuda a evitar un mal uso de esta herramienta, y de sus resultados.

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 Racionalización 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.



Figura 2. Normas generales que rigen la aplicación del Análisis del Ciclo de Vida

#### 4.7 ¿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 Análisis del Ciclo de Vida. 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, o el Journal of Resources conservation and recycling.



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

#### 4.8 ¿CÓMO SE DEFINE EL MÉTODO DEL ACV?

La definición dada por SETAC (1993) para el método del ACV es la siguiente:

*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 Análisis de Ciclo de Vida 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.

#### 4.9 ¿CÓMO SE REALIZA UN ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA?

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

El método tiene cuatro partes fundamentales, que son:

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, 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, 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..

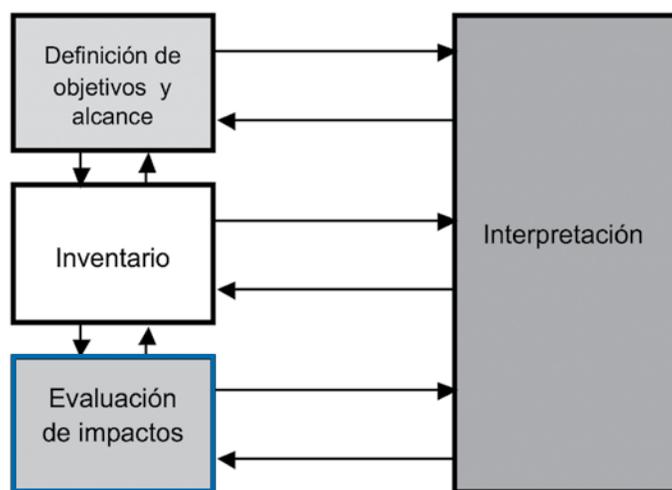


Figura 4. Fases fundamentales del Análisis del Ciclo de Vida

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, un análisis que conduce a la elaboración de propuestas que reduzcan el impacto producido por el sistema analizado. Por este motivo el análisis en general es iterativo.

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.

#### 4.10 ¿CÓMO SE PUEDE SIMPLIFICAR LA REALIZACIÓN DE UN ACV?

El método del ACV es de carácter dinámico, y las cuatro etapas en las que se realiza están relacionadas entre sí, por lo que a medida que se obtienen resultados se pueden modificar o mejorar los datos, las hipótesis, los límites del sistema o los objetivos, lo que exige 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 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 aplicable 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 a las cuales todavía no se han incorporado, por ejemplo, perfiles ambientales nacionales.

#### 4.11 DESCRIPCIÓN DE LAS ETAPAS PARA REALIZAR UN ACV

##### 4.11.1 ETAPA 1: DEFINICIÓN DE OBJETIVOS Y ALCANCE

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

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.

Ejemplos:

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

El alcance indica la amplitud, profundidad y detalle del estudio, a través de 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 litro, o 1m<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?
  - Limitaciones del estudio
- ¿Qué precisión se requiere?
  - Calidad de los datos
- ¿Quiénes son los destinatarios?
  - Formato del reporte

A continuación se citan como ejemplos algunos objetivos de estudios de ciclo de vida para el sector de agroalimentos:

**Carne bovina:** distintos sistemas productivos (feedlot o engorde a corral versus pastoreo directo)

**Producción frutihortícola:** distintos sistemas de irrigación (goteo versus manto) e influencia en huella energética e hídrica

**Pollo:** consumo de producto local versus congelado

**Algodón:** producción en secano versus riego suplementario

**Yerba mate o té:** comparación orgánica o convencional

**Agua:** evaluación de distintas alternativas de packaging (material de la botella, volumen, estrategia de fin de vida)

**Queso:** comparación de distintos sistemas productivos, comparación del impacto ambiental según la cuenca productiva, evaluación del impacto del uso de agua.

## LA DEFINICIÓN DEL SISTEMA Y SUS LÍMITES

Por definición de ACV en un estudio se deberían considerar todos los flujos 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. ¿Hasta dónde se debe continuar? Por otra parte, en la fabricación de casi cualquier producto, por ejemplo tomate, 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 productor de tomates, 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, los cuales 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 otra 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 como están relacionados entre sí es muy complejo; por lo tanto el estudio es muy costoso. Será necesario establecer estrategias que mantengan el análisis en un equilibrio que concilie la practicidad y la consistencia. Éstas 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 ésta es poco confiable, como muestra la siguiente figura. De este modo se establecen los límites del sistema en estudio, documentando las exclusiones e inclusiones.

Otro modo de establecer los límites del sistema a analizar se representa en la siguiente figura:

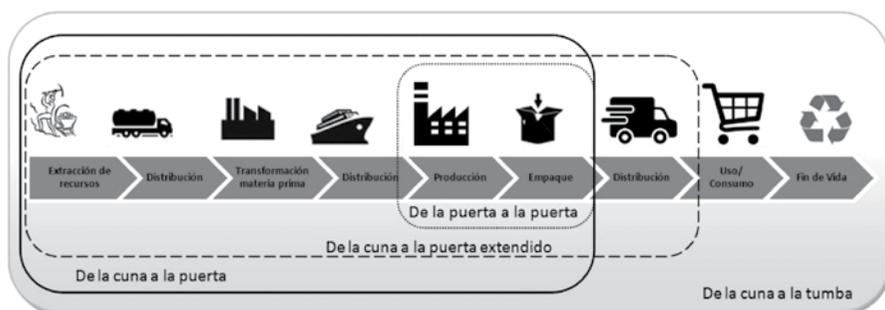


Figura 5. Límites del sistema típicamente utilizados en un Análisis del Ciclo de Vida

Si bien la definición del método adhiere a la representación de límites indicados dentro del recuadro externo (de la cuna a la tumba), es lícito modificar el alcance según el objetivo del estudio, siempre que éste 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 éste se encuentra en la planta listo para ingresar en el mercado, el estudio es conocido como de la cuna a la puerta (límites indicados con línea continua). Ésto puede ampliarse para incluir alguna etapa posterior, por ejemplo el transporte hasta un centro de distribución (límites indicados con línea de guiones). 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 punteada).

En los sistemas agrícolas la definición de los límites juega un rol muy importante. Algunos ejemplos de exclusiones e inclusiones son (Nemecek et al. 2007):

- Considerar que el balance de carbono del suelo permanece constante, lo que implica que todo el C incorporado en la planta es tomado del CO<sub>2</sub> atmosférico
- Los impactos asociados a la producción y almacenamiento del abono de origen animal (incluyendo sus emisiones, la infraestructura necesaria) se asigna a esa cadena productiva (animal), no a los inventarios de los cultivos donde se usan.
- Las emisiones por la aplicación del abono se consideran en el sistema agrícola que lo utiliza.
- El eventual uso de aguas residuales como fertilizante agrícola se carga al sistema de tratamiento de aguas.

La siguiente figura muestra un esquema de límites para un sistema de producción de leche.

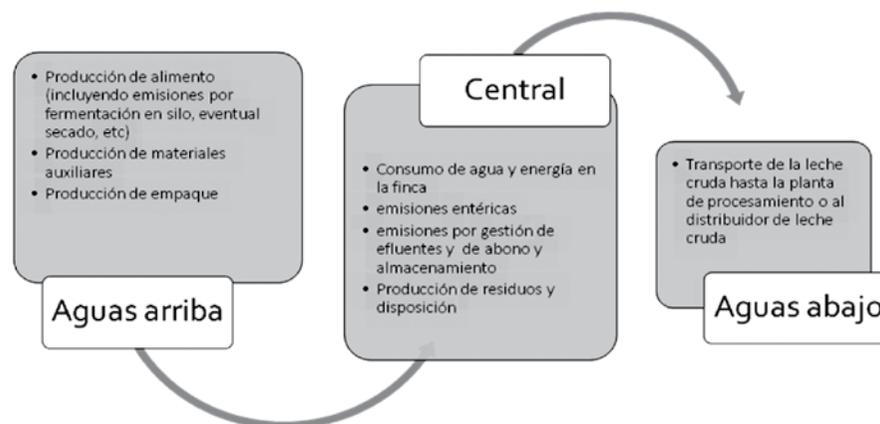


Figura 6. Límites para un sistema de producción de leche

### IDENTIFICACIÓN DE FUNCIONES

Una característica distintiva del ACV es que relaciona el impacto sobre el ambiente con la función del producto analizado, es decir que el punto central no es el producto en términos físicos, sino el servicio o función que éste ejerce, y sobre éste es que 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 debemos 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 siguiente tabla se presentan algunos ejemplos.

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

EJEMPLO	1	2
<b>Sistema</b>	<b>Vacuno</b>	<b>Cogeneración</b>
Funciones	Producción de carne Producción de leche	Generación de energía eléctrica y producción de vapor
	Producción de cuero Otros	

## SELECCIÓN DE LA UNIDAD FUNCIONAL

Una vez elegida la función se selecciona la unidad funcional, que representa la referencia elegida para expresar los resultados. Es decir, la unidad funcional (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 Análisis de Ciclo de Vida se refieren a la unidad funcional; debe por lo tanto ser un valor cuantificable y aditivo.

Si por ejemplo se analizan distintos modos para secar manos (por ejemplo, secador eléctrico, toalla de algodón lavable, toallas de papel descartables), porque se quiere 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, toalla de algodón, y se obtendrá la respuesta sobre cuál es la mejor alternativa.

Algunas unidades funcionales utilizadas con frecuencia en el sector de alimentos son:

- masa
- volumen
- área cultivada
- contenido energético (calorías)
- contenido proteico
- porción (por ej. 450 gr)
- valor económico

La elección de la masa con UF facilita la comparación entre productos, pero no puede contemplar las diferencias sustanciales que existen de los beneficios que las personas obtienen de los alimentos, como el valor nutricional.

Por éstos distintos autores han realizado propuestas alternativas (Kägi et al. 2012, Kendall et al. 2012, etc.).

## 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 la función cuantificada por la unidad funcional, lo que toma el nombre de Flujo de referencia.

Por ejemplo, siguiendo con el ejemplo de secado de 1000 pares de manos, el flujo de referencia para el caso de toallas de papel desechables podrían ser "2000 toallas de papel", si hiciera falta una toalla por mano (lo que constituye el rendimiento del producto "toalla de papel").

## COMPARACIÓN DE PRODUCTOS

La definición de la unidad funcional está estrechamente relacionada con el objetivo del

\* Ver último párrafo del apartado 2.

estudio. Si éste es la comparación de productos, se debe estar seguro que la comparación sea válida, que eventuales funciones adicionales han sido identificadas y descritas, 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.

Es necesario cerciorarse que la comparación se basa en la misma unidad funcional y en consideraciones metodológicas equivalentes, como el rendimiento, los límites del sistema, la calidad de los datos, los procedimientos de asignación, etc.

## 4.11.2 EL INVENTARIO DE CICLO DE VIDA

El inventario 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). Consiste básicamente 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 del sistema, y se identifican y cuantifican los flujos salientes del sistema, que se pueden manifestar como flujos gaseosos, líquidos o sólidos.

El inventario es la fase más laboriosa de un estudio de ciclo de vida. Sin embargo, las decisiones tomadas en las etapas anteriores (definición de objetivos y alcance), tienen muchas veces mayor influencia sobre los resultados.

### DEFINICIÓN DE LAS ENTRADAS Y SALIDAS DEL SISTEMA

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

### DETERMINACIÓN LOS PROCESOS UNITARIOS DEL PRODUCTO DEL SISTEMA

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 tratamiento, el producto intermedio y el subproducto.

### RECOLECCIÓN INICIAL DE DATOS PARA CADA PROCESO UNITARIO

El inventario 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 ajenos 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 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 (por ej. kg), 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 el período al cual corresponde, 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, la 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)
- El medio de transporte (camiones, buques, avión, etc.)
- El vector energético (diesel, eléctrico, gas, etc.).

Se debe incluir información sobre viajes de vuelta vacíos o llenos.

#### APLICACIÓN DE REGLAS DE DECISIÓN

- a- Para la masa: es frecuente aplicar reglas para flujos de entrada del sistema, por ejemplo todo flujo cuya masa sea inferior a un porcentaje determinado del total de masa entrante a dicho proceso se descarta, o bien establecer un porcentaje de contribución acumulada al sistema estudiado (por ej. la suma de los materiales incluidos deben superar el 99 % del total de masa entrante).
- b- Para la energía se puede adoptar un criterio semejante: incluir procesos hasta que se exceda un porcentaje fijo (por ej 99 %) del consumo total de energía.

#### LA ASIGNACIÓN DE CARGAS

El objeto de estudio del ACV es un sistema, y no un producto, por lo que cuando el sistema elabora más de un producto útil (por ejemplo en una destilería, central de cogeneración, etc.), es necesario repartir entre ellos la cantidad de recursos utilizados por el sistema, y los problemas ambientales que su funcionamiento origina. Esto ocurre en casi todos los sistemas modernos.

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: consecuente 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 sistemas-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 dos productos, biodiesel y glicerina, la expansión de límites respondería al siguiente esquema:



Figura 7. Ejemplo de asignación de cargas en un sistema multiproducto

El procedimiento exigiría realizar un inventario de procesos alternativos que elaboren 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 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 de los costos. Entre los parámetros más utilizados para distribuir las cargas energéticas y ambientales en un sistema multiproducto se encuentran la masa, el valor económico, o la energía asociada a cada flujo saliente.

La Norma ISO 14044 establece el siguiente criterio preferente:

- Donde sea posible, se debe evitar la asignación mediante:
  - División del proceso unitario a asignar entre dos o más subprocesos y recolectar los datos de entrada y salida (input y output) relacionados con ellos;
  - expansión del sistema producto para incluir funciones adicionales relacionadas con los co-productos
- Repartir inputs y outputs del sistema entre sus distintas funciones de modo que refleje las relaciones físicas que subyacen entre ellas (por ej. masa, contenido energético, contenido exergético).
- Repartir datos de input y output entre los co-productos en proporción a su valor económico.

## LIMITACIONES DEL INVENTARIO

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

Otro aspecto importante es que en los resultados del inventario hay una incertidumbre debida a la acumulación de los efectos introducidos por la incertidumbre de los datos utilizados. Un estudio de incertidumbre aplicado al inventario puede ser incluido para explicar y soportar las conclusiones del mismo.

Por otro lado, durante el inventario se pueden agregar emisiones que ocurren en distintas operaciones, lugares geográficos y tiempos, o aún emisiones de distintos tipos. Esto puede producir una pérdida de transparencia en los resultados obtenidos.

Por último, el inventario 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.

### 4.11.3 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 resultados obtenidos (que pueden alcanzar centenares de valores), es muy difícil hacer una evaluación ambiental de un producto o sistema a partir de ellos.

Es por este motivo que luego del inventario sigue la fase de evaluación de impactos, que consiste en un proceso para caracterizar y estimar los efectos de los resultados del inventario, donde se evalúan las modificaciones ambientales y los consumos de recursos producidos.

En general se habla de "impactos potenciales", ya que durante el inventario 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.

La fase de evaluación de impactos completa consta de los siguientes puntos obligatorios según la ISO 14040:

- definición de categorías
- clasificación
- caracterización.

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

- normalización: consiste en el cálculo de magnitudes de los indicadores relativos a valores de referencia

- agrupamiento: ordenamiento y ranking de los indicadores
- ponderación: consiste en 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.

## DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN DE CATEGORÍAS

Consiste en definir las categorías de impacto que se considerarán en el estudio, y en clasificar los impactos producidos por las distintas sustancias, definiendo equivalencias entre las distintas sustancias que concurren a un efecto particular a través factores de clasificación.

La clasificación consiste en la asignación de los resultados del inventario a las categorías de impacto identificadas. Durante la clasificación se condensan los resultados del inventario en un número limitado de aspectos ambientales estudiados, lo que permite realizar una primera interpretación del ACV.

A partir de la intervención ambiental aparece una cadena de eventos físicos, químicos y biológicos que relacionan el flujo elemental con una categoría ambiental afectada, que se llama proceso ambiental. Las categorías pueden considerarse en el punto final de esa cadena (por ejemplo, pérdida de biodiversidad, o daños sobre la salud humana, o sobre los recursos), o bien en algún punto anterior (por ejemplo, el cambio climático, o el adelgazamiento de la capa de ozono, o la acidificación).

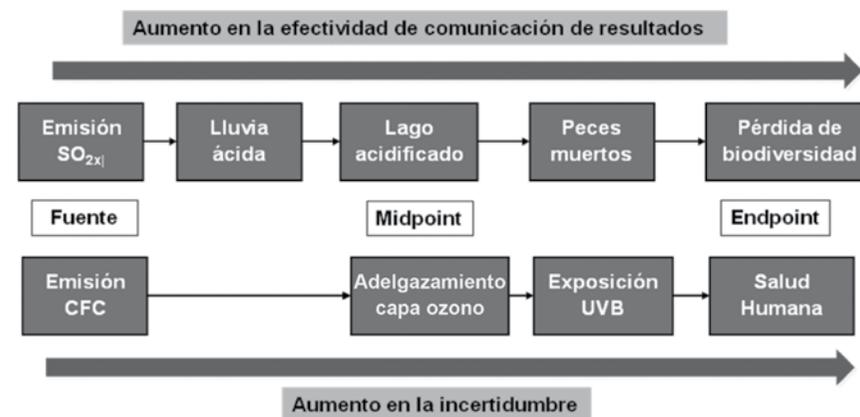


Figura 8. Ejemplo de una secuencia de cálculo de Categorías de impacto Midpoint y Endpoint

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

Las categorías de impacto de punto intermedio se clasifican también en función de la escala en la que actúan (global, regional y local).

Tabla 2. Categorías de Impacto Midpoint (punto intermedio) en función de la escala en la que actúan (fuente: Badino et al., 1998)

ESCALA	EFEECTO
Global	Efecto invernadero
	Adelgazamiento de la capa de ozono
	Consumo de recursos no renovables
Regional	Acidificación
	Eutrofización
	Formación de smog fotoquímico
	Toxicidad crónica
Global	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 interesan no sólo al país donde se producen, sino también a sus limítrofes.

### CARACTERIZACIÓN

Consiste en el cálculo de los resultados de los indicadores de categorías, que se realiza multiplicando el intercambio ambiental producido por un factor que representa cuánto contribuye ese intercambio ambiental a un determinado impacto ambiental. Si una determinada emisión o consumo, contribuye a más de un impacto ambiental, tendrá un factor de impacto para cada uno de esos impactos.

Como ya se ha establecido, 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.

Se muestra como ejemplo la caracterización para la categoría de impacto del efecto invernadero.

El efecto invernadero potencial causado por un proceso se puede estimar calculando el producto de la cantidad de cada gas invernadero emitido por kg de material producido y el potencial de efecto invernadero en kg equivalentes de CO<sub>2</sub> por cada kg de ese gas. Esto se realiza para cada gas, y al final se suman las contribuciones que cada uno de ellos realiza:

$$\text{Efecto invernadero potencial (kg equiv. CO}_2\text{)} = \sum GWP_i \cdot m_i$$

La siguiente tabla resume distintos impactos de punto intermedio, los factores de clasificación y las unidades de medida comúnmente utilizadas:

Tabla 3. Efectos ambientales, factores de clasificación y unidad de medida (Fuente: Dessy P. et al., 1996)

EFEECTO AMBIENTAL	FACTOR DE CLASIFICACIÓN		UNIDAD O SUSTANCIA GUIA (mayormente responsable del efecto)
Aumento del efecto invernadero	GWP		kg de dióxido de carbono equivalente (CO <sub>2</sub> )
Deterioro de la capa de ozono	(Global Warming Potential)		kg de triclorofluorometano equivalente (CFC11)
Toxicidad humana	HCA (aire)	TOX (hombre)	kg de peso corporal contaminado al límite máximo diario aceptable
	HCW (agua)	TOX (ecosistema)	
	HCS (suelo)		
Formación de oxidantes fotoquímicos	POCP (Photochemical Ozone Creation Potential)		kg de etileno equivalente (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )
Acidificación	AP (Acidification Potential)		kg de dióxido de azufre equivalente (SO <sub>2</sub> )
Eutrofización	NP (Nutrification Potential)		kg de fósforo equivalente (composición media de: C <sub>106</sub> H <sub>263</sub> O <sub>110</sub> N <sub>16</sub> P)
Deterioro del territorio			km <sup>2</sup> sujetos a deterioro por causas legadas a: - ruidos > 50 dB(A) - olores > 1 unidad de olor por m <sup>3</sup> - accidentes > 10E <sub>6</sub> riesgo de 1 mortalidad por año
Deterioro de los recursos naturales			Toneladas por escasez. El peso relativo está determinado por el grado de escasez que se mide en años que faltan hasta la extinción del recurso en cuestión, sobre la base de los consumos mundiales de recursos.

## NORMALIZACIÓN DE LOS IMPACTOS

Finalizada la fase precedente, se encuentra que los distintos efectos ambientales de punto intermedio presentan unidades de medida distintas. Si se desea obtener para cada proceso estudiado un perfil sintético apto para ser confrontado con otros perfiles, será necesario normalizar los resultados. Los distintos perfiles ambientales se comparan entre sí.

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

1. El método del *Centre of Environmental Science* (CML - *University of 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>.
2. El método danés de la Universidad de Copenhague propone el concepto de "person-equivalent", relacionando el impacto producido por el producto con el impacto de una persona (promedio mundial, o nacional).
3. 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.
4. Un cuarto método desarrollado por el Swedish Environmental Research Institute, denominado Environmental Priority Strategies (EPS), 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 proceso productivo, o por ejemplo del producto edilicio.

## PONDERACIÓN

La ponderación requiere de juicios de valor sobre la importancia relativa de las categorías de impacto. Esto no puede hacerse sobre la base de las ciencias naturales. 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.

## 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, 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, no obstante 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 en la agrupación y la ponderación u otros procedimientos utilizados en normalización de resultados puede ser cuestionable.

## 4.11.4 EVALUACIÓN E INTERPRETACIÓN.

En esta 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 del estudio 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.

## 5. SECCIÓN 2 / INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS DE LA HUELLA HÍDRICA

### 5.1 DEFINICIONES IMPORTANTES

Antes de empezar a hablar de la Huella Hídrica (HH) propiamente dicha, será necesario definir conceptos claves (ISO 14046), entre ellos:

**Agua dulce:** agua con una baja concentración de sólidos disueltos

- Nota: el agua dulce típicamente contiene menos de 1.000 mg/l de sólidos disueltos y en general se acepta como adecuado para la retirada y el tratamiento convencional para producir agua potable.
- Nota: la concentración de sólidos disueltos totales puede variar considerablemente en el espacio y / o tiempo.

**Cuerpo de agua:** entidad de agua con unas características hidrológicas, hidrogeomorfológicas, físicas, químicas y biológicas definidas en un área geográfica determinada (ej. lagos, ríos, aguas subterráneas, los mares, los témpanos, glaciares y embalses).

**Cuenca hidrográfica:** área de la cual el agua de escorrentía superficial debida a la precipitación drena por gravedad en un cuerpo corriente u otro cuerpo agua.

- Nota: los términos "cuenca", "área de drenaje", "captación", "área de influencia" o "cuenca hidrográfica" a veces se utilizan para el concepto de "cuenca hidrográfica".

**Flujo elemental de agua:** agua que entra en el sistema en estudio que se ha extraído del medio ambiente, o el agua que sale del sistema que se está estudiando que se libera en el medio ambiente.

**Uso de agua:** uso de agua para las actividades humanas

- Nota: el uso incluye, pero no se limita a, cualquier extracción de agua, liberación de agua o de otras actividades humanas dentro de la cuenca de drenaje.

**Consumo de agua:** el término "consumo de agua" se utiliza a menudo para describir agua extraída, pero no devuelta a la misma cuenca de drenaje. El consumo de agua puede ser debido a la evaporación, transpiración, la integración en un producto, o la liberación en una cuenca de drenaje diferente o el mar.

**Extracción de agua:** extracción antropogénica de agua de cualquier cuerpo de agua o cuenca hidrográfica ya sea temporal o permanente.

**Degradación del agua:** cambio negativo de la calidad del agua

**Calidad del agua:** propiedades físicas (por ejemplo, térmico), químicas y biológicas del agua con respecto a su idoneidad para el uso en actividades humanas y/o para el mantenimiento de la actividad de los ecosistemas.

**Análisis de inventario de huella hídrica:** fase de estudio de la HH que comprende la recolección y cuantificación de las entradas y salidas del sistema bajo estudio relacionadas con el agua.

- Nota: incluye cuando sea relevante emisiones al aire, al agua y al suelo.

**Huella hídrica exhaustiva:** evaluación de la HH que cumple con el principio de exhaustividad. Este principio implica considerar todos los aspectos y atributos ambientalmente relevantes sobre (i) el ambiente natural, (ii) la salud humana y (iii) los recursos naturales incluyendo análisis tanto de la disponibilidad del agua como de su degradación.

**Perfil de huella hídrica:** relación de categorías de impacto que hacen referencia a impactos ambientales potenciales relacionados con el agua.

- Nota: si el perfil de HH es exhaustivo se podrá llamar al resultado huella hídrica sin ningún otro calificativo. En el caso que el perfil no sea exhaustivo (sólo analice determinadas categorías de impacto) se deberá añadir un calificativo, por ejemplo, huella de escasez de agua.

### 5.2 EL AGUA A NIVEL MUNDIAL

#### 5.2.1 EL CICLO DEL AGUA

El ciclo del agua describe la presencia y el movimiento del agua en la Tierra y sobre ella. El agua de la Tierra está siempre en movimiento y constantemente cambiando de estado, desde líquido, a vapor, a hielo, y viceversa. (Figura 9)



Figura 9. El ciclo del agua (Fuente: [www.water.usgs.gov](http://www.water.usgs.gov))

La Figura 10 muestra que la mayor parte de agua presente en la tierra se encuentra en los océanos (97%) y que solo un 3% es agua dulce, de la cual un 2% se encuentra en forma de hielo y por lo tanto sólo un 1% está disponible para el uso humano y para el mantenimiento de los ecosistemas terrestres.

Se estima una precipitación anual en la superficie terrestre de 119.000 km<sup>3</sup>, de los cuales un 62% son devueltos a la atmósfera debido a procesos de evapotranspiración y sólo el 38% queda en superficie terrestre en forma de escorrentía o infiltración. Del agua disponible, se estima que sólo un 3% es realmente usado por los humanos, y de ésta, más del 70% es utilizado para fines agrícolas mientras que el 20% se destina a usos industriales y sólo el 10% restante es utilizado por los consumidores finales.

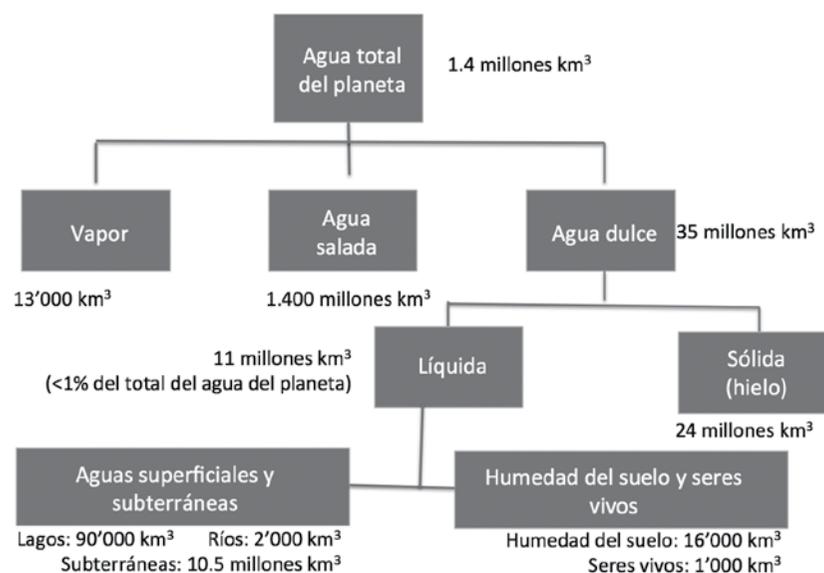


Figura 10. Volumen en la hidrósfera (Fuente: Adaptado de Shiklomanov and Rodda, 2003).

### 5.2.1 LA PROBLEMÁTICA DEL AGUA

Durante el siglo XX, la población mundial se ha triplicado, sin embargo, el uso de los recursos hídricos se ha multiplicado por seis en el mismo período. Se estima que dentro de los próximos cincuenta años, la población mundial aumentará en otro 50%. Este crecimiento de la población, junto con la industrialización y la urbanización, dará lugar a una creciente demanda de agua y tendrá graves consecuencias sobre el medio ambiente (World Water Council, Consejo Mundial del Agua). El agua dulce es un recurso esencial para la salud de los humanos y los ecosistemas y aunque el agua sea abundante a nivel global,

los recursos hídricos están recibiendo mucha presión tanto a nivel de uso y consumo así como de contaminación en muchas regiones del mundo. Como consecuencia, el agua se ha convertido en un recurso estratégico para el desarrollo económico y supervivencia de los países debido a la escasez del agua para el consumo humano y a la pérdida de calidad original. Según expertos de Naciones Unidas, 2 de cada 10 personas en el mundo- más de mil millones de personas- carecen de fuentes de agua potable, y 2 de cada 6 personas no tiene acceso a un saneamiento básico (más de 2,6 billones de personas), provocando que 3.900 niños mueran cada día por enfermedades relacionadas con el agua (WHO, 2014).

La problemática del agua la asociamos a dos factores, (i) en primer lugar a la escasez de agua (falta de agua para satisfacer las necesidades humanas y mantener la calidad de los ecosistemas) y (ii) en segundo lugar a la disminución de la calidad del agua (contaminación de los cuerpos de agua).

En referencia al primer factor, la Figura 11 muestra un mapa del mundo con una evaluación de la escasez de agua en distintas regiones. Un valor de 1 hace referencia al valor promedio de escasez de agua a nivel mundial y por ejemplo, un valor de 10 hace referencia a una escasez de agua 10 veces superior al promedio mundial.



Figura 11. Escasez de agua a nivel mundial según el método AWARE (Fuente: <http://wulca-waterica.org/project.html>)

En referencia al segundo factor, la pérdida de calidad de agua debido a problemas de contaminación, entendiendo ésta como la incorporación al agua de materias extrañas, (como microorganismos, productos químicos, residuos industriales y de otros tipos, o aguas residuales domésticas) hacen que importantes volúmenes de agua de baja calidad no sean útiles para los usos pretendidos.

Entre los problemas más importantes destacan:

- Destrucción de ecosistemas acuáticos, debido a la extrema toxicidad de los desechos industriales.
- Generación de enfermedades en la población humana como hepatitis, cólera y disentería por culpa de la contaminación de cuerpos de agua debido a una falta de saneamiento.

- Efectos nocivos en el desarrollo de las especies en base a la debilitación de su sistema inmunológico, dificultades en la reproducción y desarrollo de enfermedades mortales.
- Concentraciones de contaminantes superiores a límites legales/recomendados que imposibilitan el uso del agua para actividades específicas (agrícolas, consumo humano, etc.).

En definitiva, podemos concluir que:

**En la actualidad existe una crisis del agua. Pero esta crisis no es consecuencia de falta de agua para satisfacer nuestras necesidades. Es una crisis generada por una deficiente gestión del agua provocando el sufrimiento tanto de miles de millones de personas como del medio ambiente (World Water Council).**

### 5.3 EL AGUA EN ARGENTINA

Argentina presenta una gran variedad de zonas climáticas, desde climas subtropicales sin estación seca en el nordeste argentino (NEA) hasta climas áridos y semiáridos en el noroeste (NOA) y oeste argentino. Por ejemplo, en la provincia de Misiones (NEA) encontramos climas subtropicales sin estación seca con precipitaciones anuales que superan los 3.000 mm. Por el contrario, en provincias como Tucumán (NOA) la precipitación anual no supera los 700 mm con una estación seca en invierno con precipitaciones inferiores a 20 mm/mes. Esta variabilidad hace que Argentina presente perfiles muy diferentes de escasez de agua. Como se observa en la Figura 11, Argentina presenta índices de escasez que van desde 10 veces menores a la media mundial en las zonas subtropicales hasta valores de escasez de agua 30 veces superiores a la media mundial, haciendo necesario una correcta gestión de los recursos hídricos especialmente en el NOA.

Con respecto a la Huella Hídrica (HH) (metodología de la WFN, ver sección 5.1), la Figura 12 muestra que en Argentina se consumen 4.400 litros de agua por persona y día y que la HH total del país es de aproximadamente 60.000 millones de m<sup>3</sup>/año. Es importante destacar que el 96% de la HH es interna, lo que significa que muy poca cantidad de agua es importada en el país en forma de bienes y productos (HH externa). Por lo tanto, es imprescindible aplicar criterios de sostenibilidad en la gestión de los recursos hídricos del país para no comprometer su viabilidad futura y asegurar una plena seguridad y soberanía hídrica.

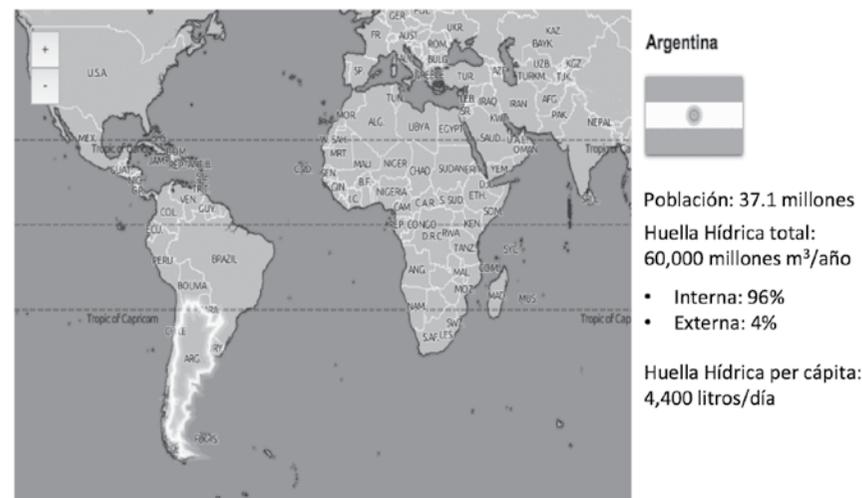


Figura 12. Huella hídrica de Argentina (fuente: adaptado de [waterfootprint.org](http://waterfootprint.org), Mekonnen & Hoekstra (2011), *National Water Footprint Accounts*, UNESCO-IHE)

### 5.4 INTRODUCCIÓN A LA HUELLA HÍDRICA

Las actividades humanas consumen y contaminan grandes cantidades de agua. Como se ha comentado, a nivel global, la mayor parte del uso de agua se produce en el sector agrícola, aunque la utilización de agua por parte de los sectores industriales y el sector doméstico no son nada despreciables.

El agua dulce se está convirtiendo, cada vez más, en un recurso global impulsado por el crecimiento del comercio de productos intensivos en el uso del agua. Aparte de los mercados regionales, también hay mercados mundiales de bienes intensivos en agua, tales como los cultivos y productos animales, fibras naturales y bioenergía. Como resultado, el uso de los recursos hídricos a nivel global está desconectado del lugar de consumo de los productos (WFN, 2009).

La HH se puede definir como:

**Indicador empírico que evalúa la problemática del agua consumida y contaminada a lo largo de toda la cadena de producción**

La idea de considerar el consumo de agua (entendiendo este consumo como agua extraída pero no devuelta a la misma cuenca de drenaje y por lo tanto, no disponible para otros usos) a lo largo de la cadena de suministro ha ganado interés después de la introducción del concepto de la "Huella Hídrica" (HH) por Hoekstra en 2002 (Hoekstra, 2009).

La evaluación de la HH, es una herramienta fundamental para ayudar a entender cómo las actividades y productos relacionados con la escasez de agua y la contaminación no contribuyen al uso insostenible del agua

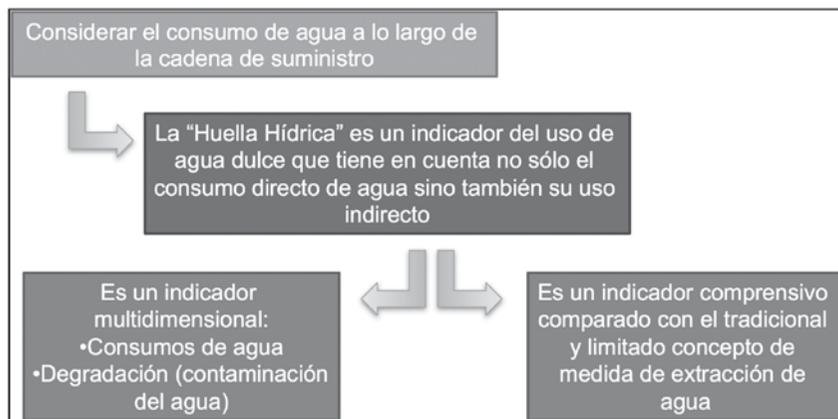


Figura 13. Definición y propiedades fundamentales de la huella hídrica como indicador ambiental

El descubrimiento de la relación oculta en el consumo de agua (considerando el consumo directo y el indirecto) puede constituir la base para la formulación de nuevas estrategias de gestión del agua. Los consumidores finales, industrias y comerciantes de productos de alto consumo de agua, que han quedado tradicionalmente fuera de los estudios/trabajos relacionados con la buena gobernanza del agua, ahora entran en escena como "agentes de cambio" potenciales.

#### 5.4.1 OBJETIVO DEL ESTUDIO

Un estudio de HH puede tener varios objetivos y ser aplicado en diferentes contextos. Cada objetivo requiere la definición de su propio alcance y por lo tanto estará sujeto a diferentes asunciones. Los objetivos más típicamente utilizados, son por ejemplo:

- Huella hídrica de un proceso
- Huella hídrica de un producto
- Huella hídrica de un consumidor
- Huella hídrica de un grupo de consumidores
- En una nación
- En una municipalidad, provincia, unidad administrativa
- En una cuenca hidrográfica
- Huella hídrica dentro de un área geográfica determinada
- Huella hídrica de un negocio/industria
- Huella hídrica de un sector industrial
- Huella hídrica de la humanidad como un todo.

La Figura 14 muestra los distintos objetivos de cálculo propuestos y la interrelación de las HH de nivel inferior para formar HH de niveles superiores.

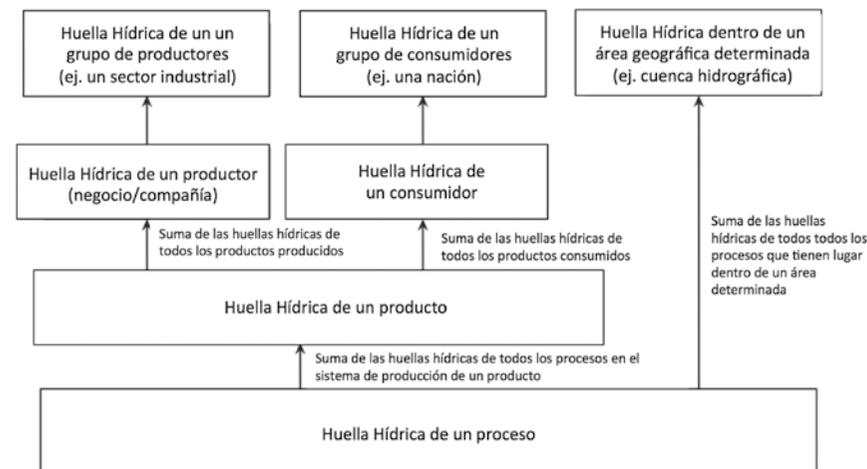


Figura 14. La huella hídrica de procesos es el bloque a partir del cual se generan las otras huellas hídricas (Fuente: adaptado de WFN, 2009).

Para el cálculo de la huella hídrica además será necesario ser claro y explícito en lo que refiere a los límites del inventario. Los límites del inventario hacen referencia a "qué incluir" y "qué excluir". Como mínimo se debería responder a las siguientes preguntas para definir el alcance del estudio:

- ¿Qué tipo de agua incluir (agua de lluvia, extracción de agua, contaminación de agua, otros)?
- ¿Dónde finalizar el análisis cuando vamos al inicio de la cadena de suministro?
- ¿Qué nivel de detalle espacio temporal es necesario?
- ¿Qué período de datos se tendrán en cuenta?
- ¿Se considerará la huella hídrica directa e indirecta?

## 5.4.2 EL BALANCE DE AGUA

Independientemente de la metodología utilizada para el cálculo de la HH será necesario realizar un balance de agua durante la fase de inventario. Un balance de agua significa un análisis detallado de las entradas y salidas de agua de nuestro sistema. La Figura 15 muestra los flujos considerados en el balance de agua (ej. base de datos Ecoinvent) así como la definición gráfica de los términos "uso de agua" y "consumo de agua". El término "consumo de agua" se utiliza para describir el agua extraída, pero no devuelta a la misma cuenca de drenaje y es la base para el cálculo de la HH.

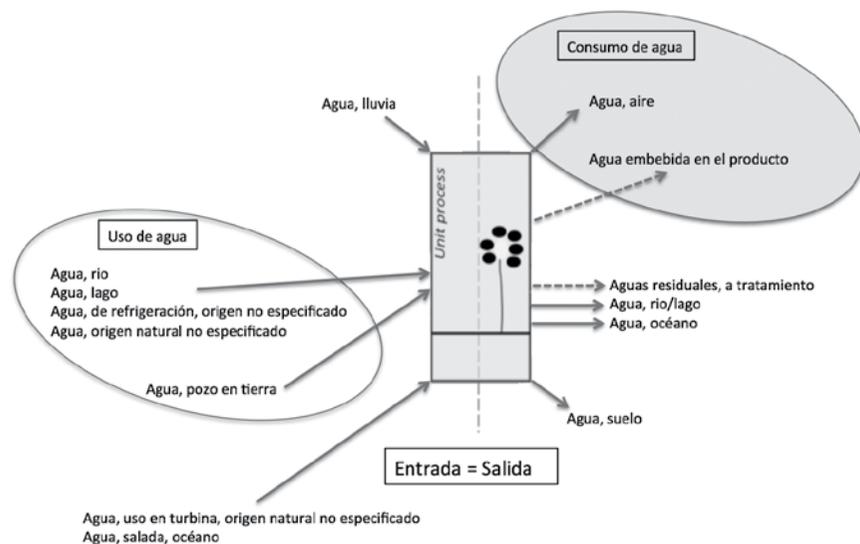


Figura 15. Definición gráfica de los términos "uso de agua" y "consumo de agua" (Fuente: adaptado de Flury et al., 2012).

Dentro de los flujos considerados, el más controvertido es el consumo de agua de lluvia, que mide la apropiación humana de recursos hídricos procedentes de la lluvia y que por lo tanto no está disponible para la naturaleza. Este flujo es especialmente relevante en procesos agrícolas y representa el costo del cultivo en términos del consumo de agua. Aún así, muchos autores sugieren que el agua de lluvia perdida por evapotranspiración durante el crecimiento de un cultivo no es significativamente diferente a la evapotranspiración de la vegetación natural y que por lo tanto el balance neto de agua no es significativamente diferente; así el agua de lluvia no debería ser considerada en el balance hídrico para el cálculo de la HH. En cualquier caso, la decisión respecto a la inclusión de este flujo deberá quedar claramente detallada en la descripción de la metodología, ya que los resultados obtenidos pueden variar en gran medida y no ser comparables entre sí. Como nor-

ma general y como se verá en los siguientes apartados en donde se detallan las distintas metodologías de cálculo, la metodología propuesta por la WFN incluye en su método de cálculo el agua de lluvia; por el contrario la metodología basada en el marco de referencia del ACV no incluye el agua de lluvia en el cálculo de la HH.

## 5.5 METODOLOGÍAS DE CÁLCULO DE LA HUELLA HÍDRICA

Principalmente dividiremos las metodologías de cálculo de la HH en dos grandes grupos:

La HH según el marco de referencia de la Water Footprint Network (WFN)

La HH según el marco de referencia del Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

La WFN define la HH como:

**"La Huella Hídrica es la medida de la apropiación por parte de la humanidad de agua dulce en volúmenes de agua consumida o contaminada"**

Mientras que en el marco de referencia del ACV, la HH se define como:

**"Medida(s) que cuantifican los potenciales impactos ambientales relacionados con el agua de productos, procesos u organizaciones"**

A partir de las definiciones anteriores se puede apreciar una diferencia muy clara y significativa: (i) La metodología propuesta por la WFN tiene un enfoque volumétrico, es decir, la HH equivale al volumen de agua consumido para la producción de un bien, servicio, etc. Por el contrario, (ii) la metodología basada en el marco de referencia del ACV no hace referencia sólo a un inventario volumétrico sino que calcula potenciales impactos mediante el uso de categorías de impacto siguiendo los estándares marcados en las ISO 14040 y 14044 referentes al ACV. Actualmente la metodología basada en el ACV es la más aceptada a nivel científico.

La Figura 16 muestra las principales diferencias entre las dos metodologías (que serán descritas en detalle en los siguientes apartados):

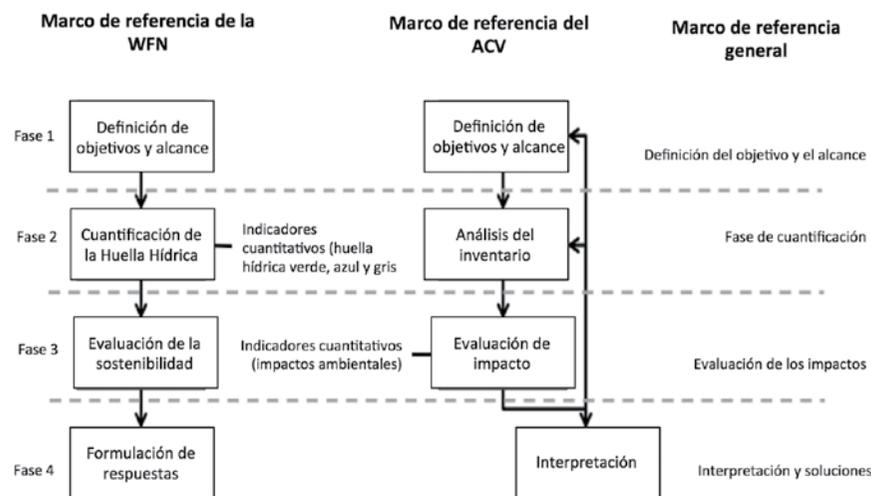


Figura 16. Diferencias entre las dos metodologías de cálculo de la HH (Fuente: adaptado de Boulay, Vionnet y Hoekstra, 2013).

### 5.5.1 LA HUELLA HÍDRICA SEGÚN LA WATER FOOTPRINT NETWORK

El indicador de huella hídrica se divide en tres colores:

- Huella hídrica verde
- Huella hídrica azul
- Huella hídrica gris

La Huella hídrica verde es un indicador del consumo de agua del "agua verde", la cual se define como la precipitación en el suelo que no es perdida por escorrentía superficial ni recarga de acuíferos, y por lo tanto se almacena en el suelo o temporalmente en la vegetación.

**La HH verde es el volumen de agua de lluvia consumida durante el proceso de producción de un bien (especialmente relevante en productos agrícolas) más el agua incorporada al producto.**

La HH verde se calcula según la siguiente ecuación:

$$HH_{verde} = \text{Evapotranspiración}_{agua\ verde} + \text{Incorporación a producto}_{agua\ verde} \left[ \frac{\text{volumen}}{\text{tiempo}} \right]$$

La HH azul es un indicador del consumo de "agua azul", la cual se define como agua dulce superficial o subterránea.

**La HH azul es el volumen de agua dulce consumida durante el proceso de producción, más el agua incorporada al producto, más el agua que no se retorna a la misma cuenca hidrográfica.**

El consumo de agua azul se da en uno de los siguientes cuatro casos:

- El agua se evapora
- El agua se incorpora al producto
- El agua es extraída pero no es retornada a la misma cuenca hidrográfica (devuelta a otra cuenca hidrográfica o al mar)
- El agua es devuelta en la misma cuenca hidrográfica por un período diferente (ej. extracción de agua en época seca y devuelta a la misma cuenca pero en época seca)

La HH azul se calcula según la siguiente ecuación:

$$HH_{azul} = \text{Evapotranspiración}_{agua\ azul} + \text{Incorporación a producto}_{agua\ azul} \left[ \frac{\text{volumen}}{\text{tiempo}} \right]$$

La HH gris es un indicador del grado de contaminación de agua dulce que puede ser asociado a una etapa de proceso.

**La HH gris es el volumen de agua dulce necesario para asimilar la carga contaminante basada en la concentración natural de fondo y los estándares de calidad ambientales actuales**

La HH gris se calcula según la siguiente ecuación:

$$HH_{gris} = \frac{L}{C_{max} - C_{nat}} = \frac{Effl \times C_{effl} - Absr \times C_{act}}{C_{max} - C_{nat}} \left[ \frac{\text{volumen}}{\text{tiempo}} \right]$$

En donde:

- L = carga contaminante
- C<sub>nat</sub> = concentraciones naturales sin actuación humanas
- C<sub>max</sub> = estándar de calidad ambiental
- Effl = volumen del efluente contaminado
- C<sub>effl</sub> = concentración del contaminante en el efluente
- Absr = volumen de extracción de agua
- C<sub>act</sub> = concentración del contaminante en el agua extraída

Por lo tanto el cálculo de la HH según la metodología propuesta por la WFN queda definido por la siguiente ecuación:

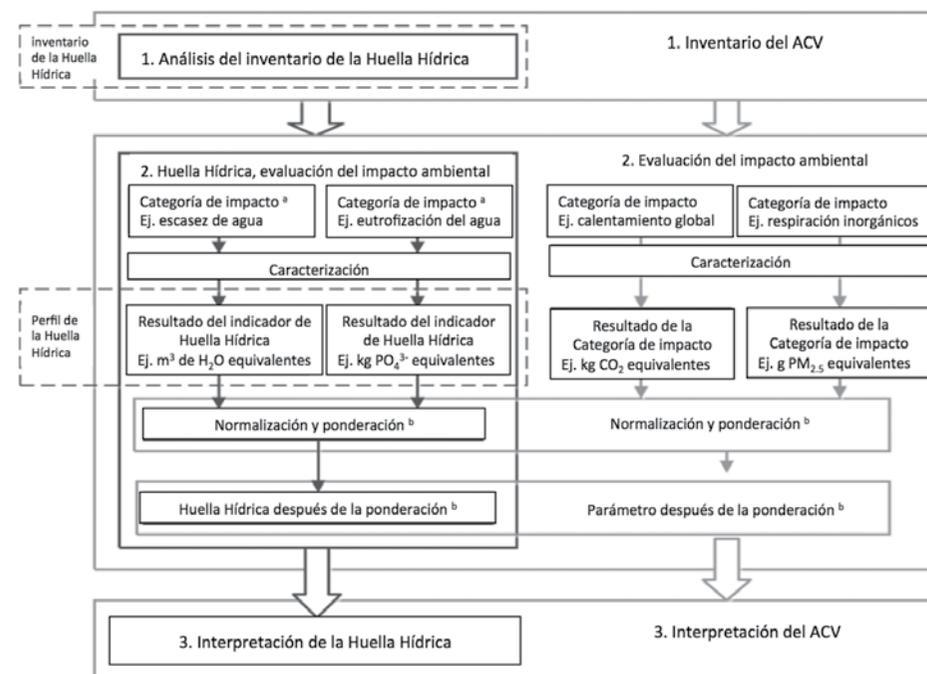
$$HH_{total} = HH_{verde} + HH_{azul} + HH_{gris} \left[ \frac{\text{volumen}}{\text{tiempo}} \right]$$

Las unidades de cálculo final variarán según el objetivo inicial del estudio, por ejemplo, si analizamos la HH de un producto las unidades serán de  $m^3_{\text{agua}}/t$ , si analizamos la HH de una región serán de  $m^3_{\text{agua}}/\text{año}$ , etc. Lo importante es remarcar el carácter volumétrico de este indicador, capaz de agrupar en un solo valor el consumo de agua (HH verde y HH azul) con la contaminación del agua (HH gris).

Para una información más detallada sobre la metodología presentada en esta sección consultar la página web <http://waterfootprint.org/en/>

### 5.5.2 LA HUELLA HÍDRICA SEGÚN EL MARCO DE REFERENCIA DEL ACV (ISO 14046)

La HH según la ISO 14046 sigue la metodología de trabajo requerida en los ACV y por lo tanto tiene que cumplir con los requisitos establecidos en las ISO 14040 y 14044. Como se observa en la Figura 16 y en la Figura 17, los pasos requeridos para el cálculo de la HH son los mismos que para un ACV tradicional: (i) Definición de objetivos y alcance del estudio, (ii) Análisis del inventario, (iii) Evaluación de impactos e (iv) Interpretación (no obligatoria).



Clave

<sup>a</sup> Ejemplos de otras categorías de impacto incluyen: ecotoxicidad acuática, acidificación acuática, contaminación térmica, toxicidad humana (debido a la contaminación del agua)

<sup>b</sup> Fases opcionales

Figura 17. Concepto de la HH como único indicador ambiental o como parte de un ACV más amplio (Fuente: adaptado de ISO 14046).

La estructura requerida para el análisis de los impactos del uso de agua está basada en la distinción entre (i) el consumo de agua (pérdida local de agua dulce por evaporación, integración al producto o descarga a otra cuenca hidrográfica o al mar) y (ii) la degradación del agua (cambio en la calidad del agua). Para la evaluación de los potenciales impactos de estos dos grandes grupos se utilizan categorías de impacto; la utilización de varias de estas categorías forman lo que se denomina perfil de HH. Las categorías de impacto recomendadas para el análisis de la HH se resumen en la Figura 18; para que se pueda considerar la evaluación de la HH como exhaustiva a nivel midpoint (punto intermedio) se incluirán como mínimo las siguientes categorías de impacto:

- Escasez de agua
- Toxicidad humana
- Ecotoxicidad acuática
- Eutrofización acuática

## Acidificación acuática

A nivel endpoint (punto final) se incluirán como mínimo las siguientes categorías de impacto:

- Salud humana
- Daño en ecosistemas

En el caso de utilizar sólo una o varias de las categorías de impacto anteriormente citadas será necesario el uso de calificadores que definan la categoría de impacto utilizada (ej. escasez de agua, eutrofización de agua dulce, etc.) y no se considerará una HH exhaustiva.

Tipos de Huella Hídrica según la ISO 14046		
	Disponibilidad de agua	Degradación de agua
<b>MIDPOINT</b>		
Perfil de indicadores midpoint	<ul style="list-style-type: none"> <li>Escasez de agua</li> <li>Disponibilidad de agua</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Toxicidad humana</li> <li>Ecotoxicidad</li> <li>Eutrofización</li> <li>Acidificación</li> </ul>
<b>ENDPOINT</b>		
Salud humana	<ul style="list-style-type: none"> <li>Malnutrición y/o enfermedades relacionadas con el agua</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Toxicidad humana</li> </ul>
Ecosistemas	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ecosistemas terrestres</li> <li>Ecosistemas acuáticos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ecotoxicidad</li> <li>Eutrofización</li> <li>Acidificación</li> </ul>

     Huella hídrica exhaustiva  
     Huella hídrica con necesidad de un calificador

Figura 18. Categorías de impacto utilizadas en el cálculo de la HH según el marco de referencia del ACV (Fuente: adaptado de Boulay y Pfister, 2013).

A nivel "Midpoint" el consumo de agua se mide con la categoría de impacto "escasez de agua" que evalúa el grado en el que la demanda de agua se equiparará a su reposición en un área determinada, por ejemplo, una cuenca hidrográfica (sin tener en cuenta la calidad del agua). Para el cálculo de la escasez de agua uno de los métodos más utilizados es el de Pfister et al. (2009), que utiliza el Índice de escasez de agua (WSI, por sus siglas en inglés) como factor de caracterización. El WSI indica el ratio de agua consumida que priva a otros usuarios o ecosistemas de esa agua para otros usos en la misma cuenca hidro-

gráfica. Utilizando el WSI como factor de caracterización se consigue calcular el impacto potencial que el consumo de agua tiene en una región determinada en términos de disponibilidad de agua para otros usos. Como ejemplo la Figura 19 muestra un mismo proceso llevado a cabo en España y Francia; al ser el mismo proceso el consumo total de agua en m<sup>3</sup> es muy similar, en cambio el impacto potencial de ese consumo de agua es mucho mayor en España que en Francia, ya que España sufre más estrés hídrico que Francia y por lo tanto tiene un WSI más elevado.

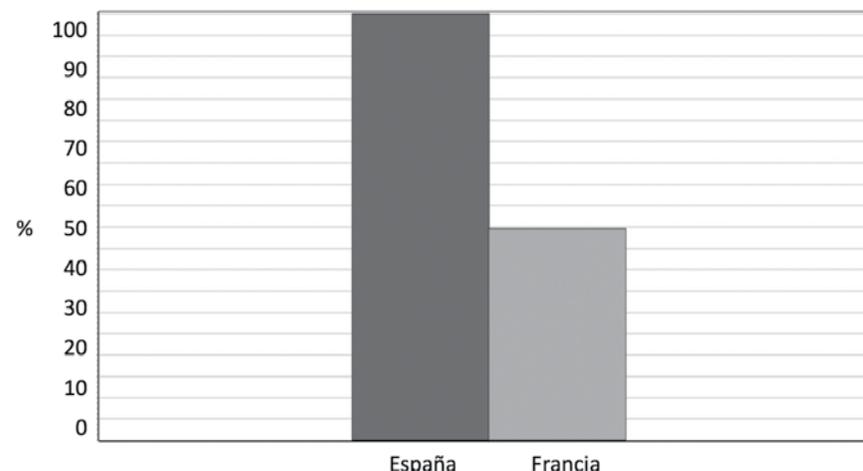


Figura 19. Evaluación de la categoría de impacto "escasez de agua" mediante el método de cálculo de Pfister et al. (2009). La barra pequeña representa el valor de la categoría de impacto en Francia y la barra grande el valor para España del mismo proceso.

Actualmente existen otras metodologías de cálculo disponibles para la categoría de impacto de "escasez de agua". Para consensuar un método de cálculo de esta categoría, el grupo de trabajo WULCA (por sus siglas en inglés *Water Use in LCA*) ha desarrollado un nuevo método consensuado llamado AWARE y que presumiblemente será el propuesto para la aplicación futura de la ISO 14046. Este método representa la relación entre la cantidad de agua disponible en una cuenca hidrográfica una vez que la demanda de agua para mantener la salud de los humanos y los ecosistemas acuáticos ha sido satisfecha (para una información más detallada consultar la página web <http://wulca-waterlca.org/project.html>).

Para el análisis de las categorías de impacto referentes a la degradación de agua se adoptan categorías de impacto contempladas habitualmente en los ACV tradicionales, utilizando metodologías de cálculo ampliamente aceptadas como ReCiPe, UESTox, IMPACT 2002.

En el caso de querer analizar los daños del uso de agua (consumo y degradación) a la salud humana, la calidad de los ecosistemas y el agotamiento de recursos se utilizará una metodología de impacto Endpoint (punto final). Al igual que en las metodologías Midpoint (punto intermedio), existen diferentes metodologías de cálculo, entre las más utilizadas: Pfister et al. (2010), Boulay et al. (2011) y Motoshita et al. (2010).

## 6. SECCIÓN 3 / CONSIDERACIONES FINALES

### 6.1 EL ACV Y LA HUELLA COMO HERRAMIENTAS DE GESTIÓN Y COMUNICACIÓN AMBIENTAL

Las compañías/industrias y las administraciones necesitan herramientas para evaluar y gestionar los impactos ambientales de sus procesos, especialmente aquéllos relacionados con el agua, ya que los riesgos relacionados con la disponibilidad de agua tenderán a cobrar cada vez más importancia a nivel internacional.

Entre los citados riesgos se destacan:

Riesgos físicos: Acceso a recursos hídricos y servicios relacionados

Riesgos legales: Regulaciones y procedimientos administrativos

Riesgos de mercado: Responsabilidad Social Empresaria (RSE) y reputación frente a los consumidores

Riesgos financieros: Los precios del agua y la energía en constante aumento lo que puede provocar una disminución de los beneficios.

El ACV en general y la HH (como categoría de impacto particular) se enmarcan dentro de las denominadas "herramientas voluntarias de gestión ambiental", entre las que destacan las ecoetiquetas (ISO 14020, 12021), los sistemas de gestión ambiental (ISO 14001, ISO14004) y los ACV (ISO 14040-44) entre otros.

La introducción de estas herramientas de gestión ambiental tiene entre otros beneficios la disminución de: (i) impactos ambientales, (ii) consumos de recursos y (iii) generación de residuos acompañados al mismo tiempo de un 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 ambiental entre los potenciales consumidores. Ser ecológico cada vez es más atractivo como estrategia empresarial, las prácticas ambientalmente sostenibles en la industria no sólo disfrutan el sentimiento favorable de la opinión pública, sino que también contribuyen al aumento del ahorro de costos, a políticas gubernamentales favorables y en general, a aumentar cada vez más la rentabilidad. Todo parece indicar, que las tendencias en el consumo y las nuevas políticas gubernamentales así como el aumento de la competitividad empresarial se dirigen aún más hacia una conversión a la "industria verde" en los próximos años.

### 6.2 DONDE 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 y la Huella Hídrica. El siguiente es un listado muy limitado que se presenta como ejemplo.

## 6.2.1 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

[www.lifecycleinitiative.org/es/](http://www.lifecycleinitiative.org/es/)  
[www.setac.org](http://www.setac.org)  
[www.life-cycle.org](http://www.life-cycle.org)  
[www.rediberoamericanadeciclodevida.wordpress.com/](http://www.rediberoamericanadeciclodevida.wordpress.com/)  
[www.eiolca.net](http://www.eiolca.net)  
[www.spold.org](http://www.spold.org)  
<http://www.doka.ch/lca.htm>  
[www.lcacenter.org](http://www.lcacenter.org)  
[www.ecomed.de/journals/lca](http://www.ecomed.de/journals/lca)  
[www.ecomed.de/journals/lca/village/aboutLCA\\_village.htm](http://www.ecomed.de/journals/lca/village/aboutLCA_village.htm)  
[www.yale.edu/is4ie](http://www.yale.edu/is4ie)  
[www.mitpress.mit.edu](http://www.mitpress.mit.edu)

## 6.2.2 HUELLA HÍDRICA

[www.waterfootprint.org/en/](http://www.waterfootprint.org/en/)  
[www.wulca-waterlca.org/](http://www.wulca-waterlca.org/)  
<https://www.linkedin.com/grps/Water-Use-in-LCA-WULCA-4450498/about>  
<http://www.gracelinks.org/1336/water-footprint-concepts-and-definitions>

## 7. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

### 7.1 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

Annika Carlsson-Kanyama (1998). Climate change and dietary choices — how can emissions of greenhouse gases from food consumption be reduced? *Food Policy*. Volume 23, Issues 3–4, November 1998, Pages 277–293

Arena, A.P. (1998) The allocation problem in Life cycle Assessment. Presentado en la "School of Environmental Science and Technology"(EdEA), Centro Atómico Constituyentes, Buenos Aires (Argentina), del 24 al 28 de agosto.

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

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

Bare, J., Pennington, D., Udo de Haes, H. (1999). Life Cycle Impact Assessment Sophistication. International Workshop. *Int. Journal of LCA*, Vol 4, N° 5, pag. 299-306.

Bengtsson, G. (1995). Working environment in LCA.. 2nd SETAC World Congress, Vancouver, November 5-9 1995. Molndal: IVF Swedish Institute of Production Engineering Research.

Bengtsson, G., Berglund, R. (1996). Life Cycle Assessments including the Working environment. Summary of methods and case studies. Molndal: IVF Swedish Institute of Production Engineering Research. (IVF Research Publication N° 95859).

Boustead, J., Hanckock, (1979). Handbook of industrial analysis.

Christel Cederberga, Berit Mattsson (2000). Life cycle assessment of milk production — a comparison of conventional and organic farming. *Journal of Cleaner Production*. Volume 8, Issue 1, February 2000, Pages 49–60

Civit, B., Arena, A.P. Terrestrial acidification: is it an impact category or relevance for ACV studies in the Argentinean western arid region?. 2nd International Conference on Quantified Eco-Efficiency Analysis for Sustainability. 28 - 30 June, 2006. Egmond aan Zee – The Netherlands

Civit, B., Arena, AP (2006). Towards the identification and calculation of characterization factors for land use in western Argentina. Expert Workshop: definition of best indicators for land use impacts in Life Cycle Assessment". University of Surrey, Guildford, 12-13 Jun 2006.

Daesoo Kim, Greg Thoma, Darin Nutter, Franco Milani, Rick Ulrich, Greg Norris (2013). Life cycle assessment of cheese and whey production in the USA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. June 2013, Volume 18, Issue 5, pp 1019-1035

Dessy P., Morfini L., Nironi L. (1996), Dalla fabbrica alla discarica, rivista Modulo, n. 223, pp. 606-610, julio-agosto

Dolle J.B., Gac A., Le Gall A. (2009). L'empreinte carbone du lait et de la viande bovine. *Renc. Rech. Ruminants*, 2009, 16. AIPE, (1998) EPS II polistirene e l'impatto ambientale, Ed. BE-MA, Milán, mayo

Erlandsson, M., Levin, P., Myhre, L. (1997). Energy and Environmental consequences of an Additional Wall Insulation of a Dwelling. *Building and Environment*, Vol 32, N. 2

F Brentrup, J Küsters, H Kuhlmann, J Lammel (2001). Application of the Life Cycle Assessment methodology to agricultural production: an example of sugar beet production with different forms of nitrogen fertilisers

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.

Finnveden, G., Andersson-Skold, Y., Samuelsson, M-O, Zetterberg, L., Lindfors L-G (1992). Classification (impact analysis) in connection with life cycle assessments – a preliminary study. In *Product life cycle assessment – principles and methodology*. Nord 1992:9. Copenhagen: Nordic Council of Ministers.

Fornaro M., (1998). Elementi per la valutazione dell'impatto ambientale di un sistema edilizio, Tesi di Laurea, Politecnico di Torino, Facoltà di Architettura, relatore: prof. Marco Filippi, Año académico 1997/98

Fullana, P., Puig, R. (1997). *Análisis del ciclo de vida*. Rubes editorial, S.L. España.

Goedkoop, M. (1995). Eco-Indicator 95, weighting method for environmental effects that damage ecosystems or human health on a European scale, Final report. RIVM.

Goedkoop, M. (1997). The Eco-Indicator 97 Explained. *Proceedings of Eco-Indicators for products and materials. State of Play'97. An International Workshop*. Toronto, Ontario, November 25 1997.

Goedkoop, M., Spriensma, R. (1999). Eco-Indicator 99, A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment. Methodology report and appendix. Pré Consultants, Netherlands. [http://www.pre.nl\(ecoindicator99/index.html\)](http://www.pre.nl(ecoindicator99/index.html)).

Guinée, J., Heijungs, R. (1993). A proposal for the classification of toxic substances within the framework of LCA of products. *Chemosphere* 26

Guinée, J., Heijungs, R., van Oers, L., van de Meent, D., Vermeire, T., Rikken, M (1996). LCA impact assessment of toxic releases. Generic modelling of fate, exposure and effect for ecosystems and human beings with data for 100 chemicals. RIVM report n. 1996/21.

Hauschild M., Wenzel, H. (1997). Global warming as assessment criteria in the EDIP-method. In Hauschild M., Wenzel, H. (eds). *Environmental assessment of products. Vol II: Scientific background*. London: Chapman and Hall.

Heijungs R., Guinée J.B., Huppes, G., Lankreijer R.M., Udo de Haes, H., Sleeswijk A; Ansems, A., Eggels, P., van Duin R., de Goede, H.(1992). *Environmental Life Cycle Assessment of products. I. Guide. II. Backgrounds*. Leiden, CML.

Hertwich, E., Pease, W., Koshland, C. (1997). Evaluating the environmental impact of products and production processes: a comparison of six methods. *The science of the Total environment*, Vol 196, (1997), pp. 13-29. Elsevier.

Hertwich, E., Pease, W., McKone, T. (1998). Evaluating toxic impact assessment methods. What works best?. *Environmental science & Technology*, Vol 32, N° 5. American Chemical Society.

ISO 14040:2006 Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework

ISO 14044:2006 Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines

ISO 14046:2014 Environmental management — Water footprint — Principles, requirements and guidelines

Jensen, A., Elkington, J., Christiansen, K., Hoffmann, L., Moller, B., Schmidt, A., van Dijk, F. (1997). Life cycle Assessment (LCA). A guide to approaches, experiences and information sources. Final Report. Report to the European Environment Agency, Copenhagen. DK-TEKNIK Energy & Environment.

Johanna Berlin (2002). Environmental life cycle assessment (LCA) of Swedish semi hard cheese. *International Dairy Journal*. Volume 12, Issue 11, 2002, Pages 939–953

Jolliet, O., Crettaz, P. (1996). Critical surface-time 95 (CST 95). A Life cycle impact Assessment methodology including exposure and fate. Laussane: EPFL Swiss Federal Institute of Technology, AITE-HYDRAM Institute of Soil and water management.

Kägi, T., Zschokke, M., & Dinkel, F. (2012). Nutrient based functional unit for meals. Paper presented at the 8th international conference on LCA in the agri-food sector, St-Malò, France.

Kendall, Brodt 2012 Comparing Alternative Nutritional Functional Units for Expressing Life Cycle Greenhouse Gas Emissions in Food Production Systems

Krewitt, W., Mayerhofer, P., Trukenmüller, A., Friedrich, R. (1998). Application of the impact pathway analysis in the context of LCA. The long way from burden to impact. *Int. J. of LCA*, Vol. 3, N° 2 (1998). Pp. 86-94. Ecomed publishers, Germany.

Life cycle assessment of drinking Darjeeling tea. Conventional and organic Darjeeling tea. Geneviève Doublet Niels Jungbluth ESU-services Ltd (2010)

Lippiatt B., (1997) BEES, in "Environmental and Economic Balance: The 21st Century Outlook" Conference, Miami, Florida, november.

Lorenç Milà i Canals, Roland Clift, Lauren Basson, Yvonne Hansen and Miguel Brandão. Con contribuciones de Alejandro Pablo Arena, Christian Bauer, Christel Cederberg, John Gardner, Wanja Margaret Kinuthia, Jesper Kløverpris, Constantinos Kosmas, Pascal Lepage, Jim Lynch, Ottar Michelsen, Ruedi Müller-Wenk, Joan Romanyà, Alexandre Rosado, Bernt Rydgren, Rita Schenck, James Schepers, Jo Treweek, Sonia Valdivia, Hayo van der Werf, Elena Vanguelova (2006). State-of-the-Art: Land Use in LCA. Expert Workshop on Land Use Impacts in Life Cycle Assessment (LCA). *International Journal of LCA* 11 (5) 363 – 368 (2006)

Nemecek, T., Kagi, T (2007). Life cycle inventories of agricultural production systems. Ecoinvent report. N 15.

Odum, Howard (1980). *Ambiente, energía y sociedad*. Editorial Blume, Barcelona 1980. Pag. 50.

Pérez Gutiérrez, Francisco Alberto (2013). Análisis del ciclo de vida comparativo de una mermelada de naranja ecológica y no ecológica Trabajo de fin de carrera. Universidad de Valladolid. Escuela de Ingenierías Industriales

Poritosh Roy, Daisuke Nei, Takahiro Orikasa, Qingyi Xu, Hiroshi Okadome, Nobutaka Nakamura, Takeo Shiina (2009) A review of life cycle assessment (LCA) on some food products. *Journal of Food Engineering*. Volume 90, Issue 1, January 2009, Pages 1–10

Powell, J., Pearce, D., Craighill, A. (1997). Approaches to valuation in LCA impact assessment. *Int. J. LCA*, Vol 2., N. 1 (11-15)

Roveda L. (1997) Valutazione della qualità ambientale di alcune soluzioni tecnologiche. Le pareti perimetrali verticali in laterizio, Tesi di Laurea in Architettura, Politecnico di Milano, relatore: S. Piardi, Año académico 96/97

Thomas Nemecek, , David Dubois, Olivier Huguenin-Elie, Gérard Gaillard (2011). Life cycle assessment of Swiss farming systems I. Integrated and organic farming. Life cycle assessment of Swiss farming systems I. Integrated and organic farming

Thomas Nemecek, Olivier Huguenin-Elie, David Dubois, Gérard Gaillard, Britta Schaller, Andreas Chervet. (2011). Life cycle assessment of Swiss farming systems: II. Extensive and intensive production. *Agricultural Systems*. Volume 104, Issue 3, March 2011, Pages 233–245

Weidema B (1999), System expansions to handle co-products of renewable materials. Pp 45-48 in Presentation Summaries of the 7th LCA Case Studies Symposium SETAC-Europe, 1999

Weidema B (2003), Market information in life cycle assessment. Environmental Project No. 863 2003. Danish Environmental Protection Agency, Copenhagen

Weidema B P, A M Nielsen, K Christiansen, G Norris, P Notten, S Suh and J Madsen (2005a), Prioritisation within the Integrated Product Policy. Environmental Project No. 980 2005, Danish Environmental Protection Agency, Copenhagen

Weidema B, Hauschild M and Joliet O (2007), Stepwise 2006 – a new environmental impact assessment method. *International Journal of Life Cycle Assessment* (In prep.). Ecomed Publishers, Landsberg

Weidema B, N Frees, E H Petersen and H Ølgaard (2003), Reducing Uncertainty in LCI - Developing a Data Collection Strategy. Environmental Project No. 862 2003. Danish Environmental Protection Agency, Copenhagen Wenzel, H., Hauschild, M., Alting, L. (1997). Environmental assessment of products. Vol 1: Methodology, tools, techniques and case studies in product development. Chapman & Hall. London.

Weidema, B., Mortensen, B., Nielsen, P. (1996). Characterization of resource depletion. Section 3 en Elements of an impact assessment of wheat production. Lyngby: Institute for product development.

## 7.2 HUELLA HÍDRICA

Boulay AM., Pfister S. (2013). ISO 14046 Water Footprinting and Water Impact Assessment in LCA Adjusted from UNEP training materials on water footprint. <http://wulca-waterlca.org/training-materials.html>. Accedido diciembre 2015.

Boulay, AM., Hoekstra, AY., Vionnet, S. (2013). Complementarities of Water-Focused Life Cycle Assessment and Water Footprint Assessment. *Environmental Science and technology* 47, pp 11926-11927.

Flury, K., Jungbluth, N., Frischknecht, R., Muñoz, I. (2012). Recommendation for Life Cycle Inventory Analysis for Water Use and Consumption. *The international journal of life cycle assessment*.





PROYECTO **MEJORA DE LAS ECONOMÍAS  
REGIONALES Y DESARROLLO LOCAL**

—  
GUÍAS  
METODOLÓGICAS:  
**ANÁLISIS DE CICLO  
DE VIDA Y HUELLA  
HIDRICA**



**INTI**



**Unión Europea**

Instituto Nacional de Tecnología Industrial  
Gerencia de Cooperación Económica e Institucional  
Avenida General Paz 5445 - Edificio 2 oficina 212  
Teléfono (54 11) 4724 6253 | 6490  
Fax (54 11) 4752 5919  
[www.ue-inti.gob.ar](http://www.ue-inti.gob.ar)



Ministerio de Producción  
**Presidencia de la Nación**