

**ECONOMÍA  
CIRCULAR**

**CICLOS,  
CIRCULOS Y  
CASCADAS**



Asociación Internacional de Residuos Sólidos

**2**





La Asociación Internacional de Residuos Sólidos (ISWA), es una asociación global independiente y sin fines de lucro, que trabaja en el interés público para promover y desarrollar la gestión sostenible de residuos.

ISWA tiene miembros en más de 60 países y es la única asociación mundial que promueve la gestión de residuos sostenible, integral y profesional.

El objetivo de ISWA, es el intercambio mundial de información y experiencias de todos los aspectos de la gestión de residuos. La asociación promueve la adopción de sistemas aceptables de gestión profesional de residuos mediante el desarrollo tecnológico y la mejora de prácticas para la protección de la vida humana, la salud y el medio ambiente, así como la conservación de los recursos materiales y energéticos.

La visión de ISWA, es una Tierra donde no existen desperdicios. Los desechos deben reutilizarse y reducirse al mínimo, luego recolectarse, reciclarse y tratarse adecuadamente. La materia residual debe ser eliminada de una manera segura, procurando un ambiente limpio y saludable. Todos los habitantes de la Tierra deberían tener derecho a disfrutar de un medio ambiente con aire, tierra, mares y suelos limpios. Para poder lograrlo, debemos trabajar juntos.

# Resumen Ejecutivo

El reciclaje es un tema que se ha debatido con mucha frecuencia en los últimos días. No hay duda de que la tecnología que termina el proceso de vida útil, está desactualizada y el reciclaje es de gran importancia para avanzar hacia una economía circular. Sin embargo, hay que aclarar que un aumento de las tasas de reciclaje es un logro significativo, pero no suficiente.

El reciclaje puede ayudar a cerrar ciclos y volver a introducir materiales en el proceso de producción. Sin embargo, los ciclos nunca son perfectos y las pérdidas son una realidad inevitable. Los materiales se mezclarán, tanto de forma intencionada como fortuita. Las moléculas sufrirán una degradación y exhibirán propiedades intrínsecas reducidas. Hasta cierto punto, las sustancias siempre se liberarán al medio ambiente en concentraciones tales que imposibiliten la recuperación. A pesar de estas limitaciones, el reciclaje es la única opción para realizar la reutilización de material. El reciclaje muestra una gran ventaja que es el ahorro de energía. Por ejemplo, el aluminio es bastante abundante, pero su producción a partir de minerales vírgenes consume 20 veces más energía que lo producido con el reciclaje de chatarra. Además, los impactos ambientales de la extracción de minerales, conversión, enriquecimiento y producción de material virgen son mucho mayores.

Sin embargo, existen numerosos procesos de reciclaje y su eficiencia en términos de calidad del material, consumo de energía, impacto ambiental o pérdida de material que podrían marcar la diferencia.

Incluso tecnologías de reciclaje similares muestran una eficiencia bastante variable dependiendo de las propiedades del material a reutilizar, como concentraciones o impurezas. Se encuentran disponibles varias herramientas de evaluación para medir el impacto de las actividades de reciclaje, de las cuales la evaluación del ciclo de vida es la más extendida. Sin embargo, lleva tiempo y permite una interpretación amplia. Dado que el reciclaje es un tema bastante complejo, su evaluación también es compleja.

El reciclaje compite con otras opciones como la reutilización o la incineración. En la gestión de recursos, no es solo elegir un método, sino que todas las opciones deben utilizarse en el momento adecuado.

Para considerar el hecho de que los ciclos no son perfectos, se ha introducido el concepto de utilización en cascada. Es el uso secuencial de materias primas biogénicas para producir materiales y energía. Cada material debe usarse varias veces, por lo que la calidad disminuirá con el tiempo. La recuperación de energía es solo el último paso para terminar la cascada. El desafío consiste en definir la cascada óptima para minimizar el consumo de recursos y energía, así como el impacto medioambiental.

No hay alternativas a la economía circular. Sin embargo, también esta necesita materiales vírgenes y energía que finalmente, generaran los flujos de residuos. Por tanto, el sector de la gestión de residuos es un socio fundamental, pero no el único.



Image by Valorsul

# Elaborado por el equipo de gestión de recursos de ISWA

**Autor principal: Andreas Bartl**  
Universidad Tecnológica de Viena  
Viena, Austria



Andreas Bartl es investigador docente en la Universidad Tecnológica de Viena desde 2002. En 2012 recibió la concesión del derecho a dar conferencias (“venia docendi”). Imparte cursos en el área de ingeniería de procesos mecánicos, tecnología de fibras y reciclaje. Comenzando con el procesamiento de fibras al final de su vida útil, Andreas entra en contacto con el sector de la gestión de residuos. Llevó a cabo varios proyectos de investigación centrados en el reciclaje de fibras de neumáticos y prendas de vestir, al final de su vida útil.

Andreas estudió Química Industrial (Ingeniería de Procesos Químicos) y recibió su “Doctorado en Ciencias Técnicas” (PhD) por su tesis “Fundamentos de la fabricación de polvos de tungsteno sin deformación”. De 1998 a 2002 fue jefe de pirotecnia de I + D y jefe de planta de imprimación en Hirtenberger AG en Baja Austria. Entre 1995 y 1998 trabajó como asistente de proyectos en la Universidad Tecnológica de Viena en cooperación con Philips Lighting Maarheeze (NL).

Andreas es miembro de la Institución de Ingenieros Químicos (IChemE), Asociación Internacional de Residuos Sólidos (ISWA), vicepresidente del grupo de trabajo ISWA para el reciclaje y minimización de residuos, Grupo de Trabajo Internacional de Residuos (IWWG), en la junta del instituto austriaco de fibras artificiales, en el consejo editorial de Waste Management & Research..

# Tabla de contenido

08	Introducción
10	Cerrando el círculo
	<b>Ventajas y desventajas del reciclaje</b>
12	
12	Términos y definiciones
12	Pérdidas y destrucción
16	El ciclo del material incompleto
18	Ventajas del reciclaje
20	Dilución
22	Indicadores
26	El modelo de cascada
	<b>Eficiencia de reciclaje: Tres casos modelo</b>
29	
29	Introducción
29	Madera / Celulosa
32	Polietileno de baja densidad
33	Polipropileno
37	Hierro y acero
	<b>Discusión, análisis y conclusiones</b>
41	
	<b>Referencias bibliográficas</b>
42	
42	Lectura general
42	Literatura citada

# Introducción

El reciclaje representa una política importante en la gestión de residuos en la actualidad. En todo el mundo existen varias definiciones de reciclaje que pueden diferir hasta cierto punto, pero es evidente que nuestra demanda de material no puede satisfacerse únicamente con recursos vírgenes. Europa <sup>1</sup> y USA <sup>2</sup> se han dado cuenta de esta escasez y han definido una lista de los llamados materiales críticos, ya que la falta de estos recursos podría interferir con el desarrollo económico. Como lo muestran Graedel & Cao, existe una correlación entre las tasas de uso de metales y el producto interno bruto<sup>3</sup>. Por lo tanto, está claro que los países desarrollados necesitan urgentemente utilizar materiales varias veces en lugar de solo una vez. Los materiales de los productos al final de su vida útil deben volver a utilizarse para el proceso de producción.

Este informe es parte del grupo de trabajo de ISWA sobre gestión de recursos (TF-RM). El alcance del TF-RM es la gestión de recursos y residuos, incluida la recuperación y uso de materias primas secundarias, combustibles y energía, fertilizantes y materia de carbono, así como la prevención en países con sistemas avanzados de gestión de residuos. Uno de los objetivos del TF-RM es mostrar qué contribución ya está haciendo y puede hacer el sector de la gestión de residuos en este campo. Además, se evalúa cómo será la transición de estas gestiones para los sectores que generan residuos. Finalmente, el objetivo es identificar las barreras y desafíos que deben superarse para apoyar esta transición.

Este informe ha sido escrito para proporcionar una descripción general sobre el tema del reciclaje. El reciclaje compite con otras opciones. El objetivo es minimizar el consumo de recursos. Existen casos en los que la recuperación de energía podría ser la mejor solución. Además, un determinado material se puede procesar con diferentes procedimientos de reciclaje, como el "reciclaje de material" o el "reciclaje químico". Por otro lado, el reciclaje puede ofrecer claras ventajas sobre la reutilización. De hecho, la eficiencia y la calidad de los procesos de reciclaje representan un tema importante, ya que de lo contrario no es posible realizar una comparación.

El documento está diseñado para:

- Mostrar los beneficios pero también las desventajas del reciclaje.
- Definir términos en el campo del reciclaje y, posteriormente, la gestión de residuos y recursos.
- Discutir el papel del reciclaje en la economía circular.
- Introducir el modelo de cascada como un enfoque práctico para considerar las pérdidas inevitables (calidad y cantidad) a lo largo del tiempo.



# Cerrando el Círculo



La figura 1 muestra una cadena de proceso de acuerdo con la tecnología usada actualmente en donde los recursos se extraen y se utilizan solo una vez. Se requiere una extracción continua de materiales vírgenes y al mismo tiempo se genera material que es eliminado. Este sistema fue la práctica común durante décadas en donde nos hemos dado cuenta de los efectos negativos, como el consumo excesivo de recursos y los problemas ambientales asociados con la eliminación.

Nuestras sociedades se han dado cuenta que se necesita urgentemente un cambio en el proceso utilizado actualmente. Como primer intento, los productos al final de su vida útil se utilizan como recursos secundarios para producir nuevas materias primas, como se muestra en la Figura 2. Está bien establecido ya, por ejemplo, que la chatarra de hierro se vuelve a introducir en el proceso de producción de acero.

Sin embargo, la Figura 2 no refleja la realidad correctamente. En la práctica existen numerosas reacciones secundarias, barreras y obstáculos. A continuación se mencionan las ventajas y las desventajas del reciclaje.

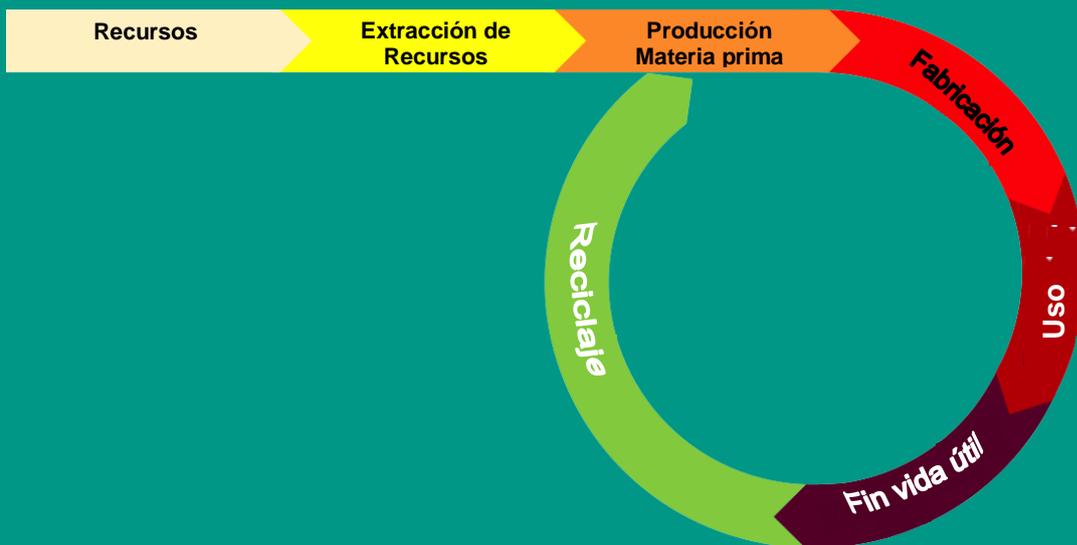
Fig. 1

# Cadena del material según la tecnología que elimina el recurso



Fig. 2

# Cadena del material convertida en un ciclo circular al incluir el reciclaje



# Ventajas y desventajas del reciclaje

## Términos y definiciones

En estos documentos se utilizan varios términos que pueden dar lugar a algunas dudas. La Tabla 1 ofrece una breve descripción de las expresiones que se utilizan a continuación en este documento.



## Pérdidas y destrucción

Aun así, no existe una definición general de reciclaje, parece claro que al menos en Europa la Directiva 98/2008 / EG (directiva marco de residuos - DMA) sirve como base común.<sup>4</sup> Según la DMA, 'reciclaje' significa cualquier operación de recuperación en donde los materiales de desecho se reprocessan en productos, materiales o sustancias, ya sea para el propósito original o para otros fines. Incluye el reprocessamiento de material orgánico, pero no incluye la recuperación de energía y el reprocessamiento en materiales que se utilizarán como combustibles o para operaciones de relleno.

Básicamente reciclaje significa que los materiales son conducidos en un ciclo. Como los elementos químicos son básicamente estables e indestructibles, parece posible realizar un ciclo cerrado que no necesita ningún insumo de material adicional. Sin embargo, en la práctica, un reciclaje al 100% como se muestra en la Figura 2 no es posible por varias razones:

### 1. Inevitable pérdidas de materiales debido a la abrasión, corrosión, etc. (disipación)

Kral et al.<sup>5</sup> utilizan el término "elementos atrapados" para indicar que una cierta fracción de material se libera a lo largo del ciclo de vida de un producto. Esta inevitable disipación en el medio ambiente convierte las sustancias en una forma irrecuperable. Como ejemplo, Ayres et al.<sup>6</sup> han señalado que cantidades significativas de cobre se pierden por corrosión (por

ejemplo, de techos y tuberías de agua) y se dispersan irrecuperablemente en el entorno. La disipación puede ocurrir no solo durante la fase de uso sino también en el transcurso del procesamiento. El aluminio generalmente está protegido contra la oxidación por una capa delgada de óxido de aluminio. Sin embargo, durante el proceso de reciclado, el metal se funde y, a temperaturas elevadas, se oxida una cierta cantidad de metal. En promedio, alrededor del 4% del aluminio se pierde por oxidación durante el proceso de refundición<sup>7</sup>. Debido a la alta superficie de las láminas, estas pérdidas pueden llegar hasta el 40%.<sup>8</sup>

Por un lado, la disipación de elementos puede causar problemas ambientales y de salud. Por otro lado, es evidente que la fracción perdida no se puede reciclar y, por lo tanto, nunca se puede alcanzar una tasa de reciclaje del 100%.

### 2. Inevitable e irreversible mezcla de contaminantes con los materiales

Puede producirse una contaminación no deseada de los productos durante todo el ciclo de vida. Para estas sustancias, Kral et al.<sup>5</sup> también utilizan el término "elementos vagabundos". Cuando se reciclan estos productos, estas contaminaciones con frecuencia no se pueden eliminar y se transfieren a la siguiente etapa.

Como ejemplo, este efecto se puede observar en productos de acero que contienen otros metales. Durante el proceso de reciclaje, la mayoría de los metales extraños se desecharán. Algunos elementos de la aleación que se desea (Ni, Mo, Co, W) permanecerán en la fase de metal de hierro, así como

# Breve definición de los términos que se utilizan en el presente informe

TÉRMINOS	DESCRIPCIÓN
Metal	Los elementos se caracterizan por una llamada unión metálica con electrones deslocalizados. Los metales muestran propiedades como la conductividad térmica y eléctrica, la opacidad y el brillo
Aleación	Una aleación es una mezcla de metales o una mezcla de un metal y otro elemento. Por ejemplo, el acero: permite el hierro y otros elementos, principalmente el carbono.
Oxidación	<p>En este contexto, la oxidación significa que los metales reaccionan con el oxígeno del aire formando óxidos. La reducción designa la reacción opuesta.</p> <p>Por ejemplo, la oxidación de aluminio a óxido de aluminio <math>4 \text{Al} + 3 \text{O}_2 \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3</math></p> <p>Por ejemplo, la reducción del óxido de titanio a titanio <math>\text{TiO}_2 + 2 \text{H}_2 = \text{Ti} + 2 \text{H}_2\text{O}</math></p>
Molécula	Una molécula es un grupo de dos o más átomos unidos por enlaces químicos. Dependiendo de la estabilidad de los enlaces, las moléculas pueden ser más o menos estables
Macromolécula	Una macromolécula es una molécula muy grande creada comúnmente por polimerización de subunidades más pequeñas. Por ejemplo, el polietileno tereftalato (PET) producido a partir de glicol de etileno y ácido tereftálico
Compuesto	Básicamente, un compuesto es un material hecho de varias sustancias diferentes, por ejemplo, hormigón (roca y cemento), asfalto (roca y alquitrán), plásticos reforzados con fibra, etc.
Producto	Los productos en este contexto son productos tangibles que pueden ser percibidos por el tacto. Pueden ser bastante simples, consistentes básicamente en un material (por ejemplo, una botella de vidrio, fibra PET) o extremadamente complejos, consistentes en numerosos componentes (por ejemplo, un vehículo, un computador).



elementos dañinos (Cu, Sn) <sup>9</sup>. El cobre y el estaño provocan una caída de la ductilidad del acero a temperaturas elevadas.<sup>10</sup> En particular, la chatarra recuperada de los vehículos al final de su vida útil puede contener cantidades considerables de cobre.

La tabla 2 muestra la distribución de elementos entre metal, desecho y fase gaseosa durante el procesamiento de Hierro, Aluminio, Magnesio y Cobre. En particular, los elementos electropositivos como el aluminio, generalmente permanecerán en la fase metálica. Esto significa que estos contaminantes, si es posible, deben eliminarse antes del proceso de refundición.

Debido a la contaminación de los materiales, con frecuencia es imposible reciclar en espacio cerrado <sup>11</sup>. Está claro que los contaminantes no removibles disminuirán la calidad del material reciclado.

### 3.- Degradación o destrucción

Un átomo es la unidad más pequeña de materia. Excepto por unos pocos isótopos radiactivos, son estables y no pueden ser destruidos o con-

vertidos de uno a otro. Por tanto, se podría concluir que los átomos se pueden reciclar infinitamente. Sin embargo, debido a las pérdidas (ver 1.) y la mezcla (ver 2.) en la práctica, el reciclaje sin fin es imposible.

En particular, los metales pueden oxidarse. Esto no significa que el átomo se destruya, sino que debe reducirse nuevamente al estado metálico. Como se muestra en el Capítulo 3.4, el aluminio se "pierde" debido a la oxidación ya que su conversión al metal consume grandes cantidades de energía.

Varias de las moléculas como el óxido de aluminio o el óxido de silicio son muy estables y los enlaces químicos no se verán afectados durante el uso o procesamiento normal de estos materiales. Nuevamente, un reciclaje infinito es imposible debido a las pérdidas mencionadas anteriormente.

Un gran número de moléculas son bastante sensibles y existe el peligro de romper los enlaces químicos, especialmente en el caso de macromoléculas o polímeros. Estas son moléculas grandes y pueden ocurrir reacciones químicas. En particular el calor (por ejemplo, durante

la fusión), radiación (ej., radiación ultravioleta durante el uso) o los impactos mecánicos provocarán una degradación o destrucción pronunciada de la macromolécula. Esto conducirá en paralelo a una clara disminución de las propiedades del material y, en casos extremos, imposibilitará el reciclaje.

Como ejemplo, se producirá una degradación clara en el reciclaje de papel. Durante cada reprocesamiento de las fibras de celulosa, se produce una reducción irreversible de la longitud y resistencia de la fibra y, por tanto, el número de ciclos es limitado. Se hace una observación similar en el reciclaje de polímeros. Badia et al.<sup>12</sup> informan que la extrusión repetida induce reacciones de escisión de cadena en el PET y, por lo tanto, una disminución drástica de las propiedades mecánicas.

Es evidente que varios materiales, en particular polímeros, son bastante sensibles a influencias mecánicas, térmicas o de otro tipo. Esto puede ocurrir tanto en la fase de uso (Ej., Radiación UV, oxidación) como durante el reprocesamiento (Ej., Degradación termomecánica). Esto significa que durante cada ciclo debe aceptarse una disminución de la calidad considerable.

Tab. 2

## Distribución de elementos entre metal, desecho y fase gaseosa durante el procesamiento de los metales seleccionados.

Fase Gaseosa	Zn Ag, Pb	Zn Cd, Hg	Hg Cd	
Fase de Desecho	Cr, Mn, V Al, Ca, Ce, La, Mg B, Nb, Si, Sr, Ta, Ti, U, Zr	Cu, Fe, Si, Mn Ag, As, Au, Bi, Ce, Co, Cr, Dy, Ga, Gd, Ge, Ho, In, Ir, La, Li, Mo, Nb, Ni, Pb, Pd, Pt, Sb, Sn, Sr, Ta, Ti, U, V, W, Y, Yb, Zn	Ag, Al, Ce, Cu, Fe, Mn, Ni, Si, Zr Bi, Ge, Hg, La, Na, Pu, Sb, Sn, Sr, Ti	Mn, Ni, Pb, Zn Al, B, Cr, Fe, Ga, Ge, In, Mg, Re, Sr, W
Fase Metálica	Co, Mo, Ni, W Cu, Sn	Mg Be, Ca	Y Ca, Gd, Li, Yb	Sn Ag, Au, Bi, Pd, Pt, Se, Rh, Te Sb
Proceso del Elemento	Fe Horno básico de oxígeno u Horno de arco eléctrico	Al Remoldeo	Mg Remoldeo	Cu Conversión

Fuente:Reck y Graedel <sup>9</sup>

■ Elementos Recuperables

■ Elementos Aleados

■ Agentes Desoxidantes



# El ciclo incompleto del material

Como se discutió anteriormente, el ciclo como se muestra en la Figura 2 no se puede realizar. Debe tenerse en cuenta una disminución inevitable en términos de cantidad y calidad. La figura 3 ofrece una vista más realista de la situación. Comprende los mismos pasos que se encuentran en la Figura 2, pero también incluye flujos adicionales. Cabe mencionar que el gráfico no muestra los flujos de energía ni considera todos los posibles flujos de material.

A continuación, se describen los términos más importantes.

## (a) Disipación

La disipación significa que durante la producción y utilización las pérdidas de material son inevitables (ver Capítulo 3.1). También se producirán más pérdidas de material durante todos los procesos de reciclaje. Las pérdidas de material deben ser reemplazadas por nuevos materiales.

## (b) Mezcla

Una mezcla de materiales se producirá durante la fabricación, ya que un producto consta de una variedad de componentes. El diseño del producto (==> c) tiene como objetivo optimizar la reciclabilidad, por ejemplo, limitando el número de materiales a utilizar. Sin embargo, en la realidad ocurre lo contrario, ya que es un hecho que los productos son cada vez más complejos y contienen más materiales diferentes<sup>13</sup>. Además, este efecto puede ocurrir durante la fase de utilización. Por ejemplo, los textiles podrían contaminarse con aceite u otras sustancias durante su uso y, por lo tanto, se evita su reciclaje posterior. También es bien sabido que una separación de materiales en el reciclaje es esencial para evitar la mezcla y permitir un buen procesos.

## (c) Diseño del Producto

El diseño del producto se presenta como un nuevo eslabón de la cadena. Entre otras cosas se compone de:

- diseño para reciclaje,
- larga vida útil,
- fácil para reparar o
- evitar sustancias tóxicas.

Hoy en día se ha descubierto que un diseño de producto adecuado puede ayudar a facilitar los procesos que tienen lugar más tarde en el ciclo del material (por ejemplo, reutilización, reparación, reciclaje). La UE ha respondido a este desafío e introdujo el "diseño ideal para el reciclaje" en varias directivas (por ejemplo, Directiva ELV<sup>14</sup>).

## (d) Preparación para la Reutilización

La reutilización en el sentido de la WFD<sup>4</sup> comprende cualquier operación mediante la cual productos o componentes que no son residuos se vuelven a utilizar para el mismo fin para el que fueron concebidos. El reutilizar disminuye la generación de residuos. El epíteto "preparación para" expresa que se requiere una limpieza, reparación o un paso similar entre dos ciclos. En este contexto, se ha sugerido como nueva categoría en el "reciclaje de productos". Significa que se mantiene la constitución química y física de un material, pero el producto no se utiliza para el propósito original, como neumáticos o botellas de vidrio como material de construcción<sup>15, 16</sup>.

## (e) Reciclaje de material

El reciclaje de materiales significa que se mantiene la constitución química de un material y solo se cambia la constitución física.<sup>15,16</sup> Esta forma de reciclaje comprende, por ejemplo:

- fusión y procesamiento de metales,
- compostaje de materiales biogénicos.

## (f) Reciclaje de materias primas

El reciclaje cambia la constitución física y química de un material<sup>15, 16</sup> como la despolimerización. Comúnmente, el esfuerzo técnico del reciclaje de materias primas es mayor que el del reciclaje de material (==> e) pero su aplicabilidad es mayor.

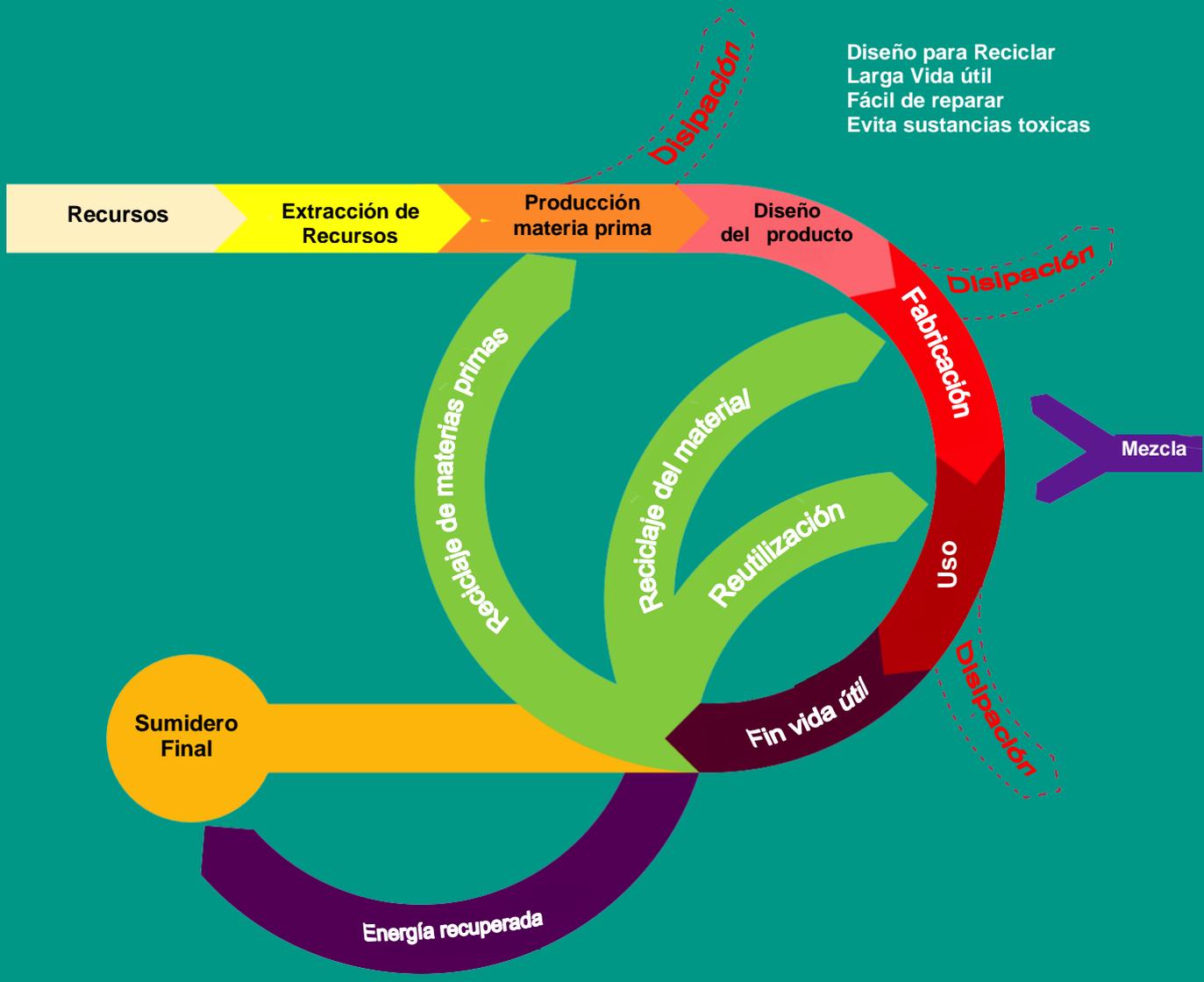
## (g) Recuperación de Energía

Como se mencionó anteriormente, la inevitable pérdida de calidad podría hacer que la incineración sea más favorable que el reciclaje. La ventaja de la incineración no es solo la recuperación de energía sino también la destrucción de sustancias tóxicas. Como menciona Brunner<sup>17</sup>, un incinerador representa un basurero final (==> h) ya que destruye sustancias peligrosas.

## (h) Sumidero final

Según Kral et al.<sup>5</sup>, "sumidero" se define como un proceso que recibe flujos de material antropogénico que no tienen valor positivo para las sociedades actuales. Además, los autores definen "sumidero final" como un sumidero que destruye una sustancia por completo (==> g) o que retiene una sustancia durante un período de tiempo muy largo. Los sumideros pueden ser hechos por el hombre (relleno sanitario) o naturales (por ejemplo, aire, agua o sedimentos) y deben ser capaces de almacenar materiales de forma segura durante períodos largos de tiempo. Brunner<sup>18</sup> ha señalado que los sumideros finales son un requisito previo indispensable para realizar ciclos de limpieza.

# Ciclo circular del material que incluye el flujo de entrada y salida del material reutilizado



# Ventajas del reciclaje

Con frecuencia se piensa que el motivo del reciclaje es la reducción del consumo de recursos primarios. Como se mencionó anteriormente, varios materiales se consideran críticos (por ejemplo, elementos traídos del exterior) y, por lo tanto, el reciclaje podría ayudar a reducir la dependencia de las importaciones.

Sin embargo, varios materiales son bastante abundantes y el beneficio del reciclaje es el ahorro de energía y, posteriormente, de dinero. Este es en particular el caso del aluminio, que constituye aproximadamente el 9% de la superficie de la tierra. Por tanto, es evidente que el reciclaje de aluminio no es una cuestión de escasez de material. El principal coste de la producción de aluminio primario es la energía (es decir, aproximadamente 165 - 295 GJ / t<sup>19, 20, 21</sup>) necesaria para el proceso de electrólisis a altas temperaturas. La demanda de energía del aluminio secundario es significativamente menor y oscila entre 10 y 15 GJ / t<sup>19, 20, 21</sup>. Se informa que la producción de aluminio primario es responsable de aproximadamente el 1% de las emisiones globales de GEI<sup>22</sup>.

de hecho, la parte de la chatarra de aluminio utilizada para la producción de aluminio es de aproximadamente el 50%<sup>23</sup>. La Figura 4 demuestra que la ventaja energética es mayor para el aluminio, pero también para otros metales básicos, el reciclaje ofrece un gran potencial de ahorro de energía.

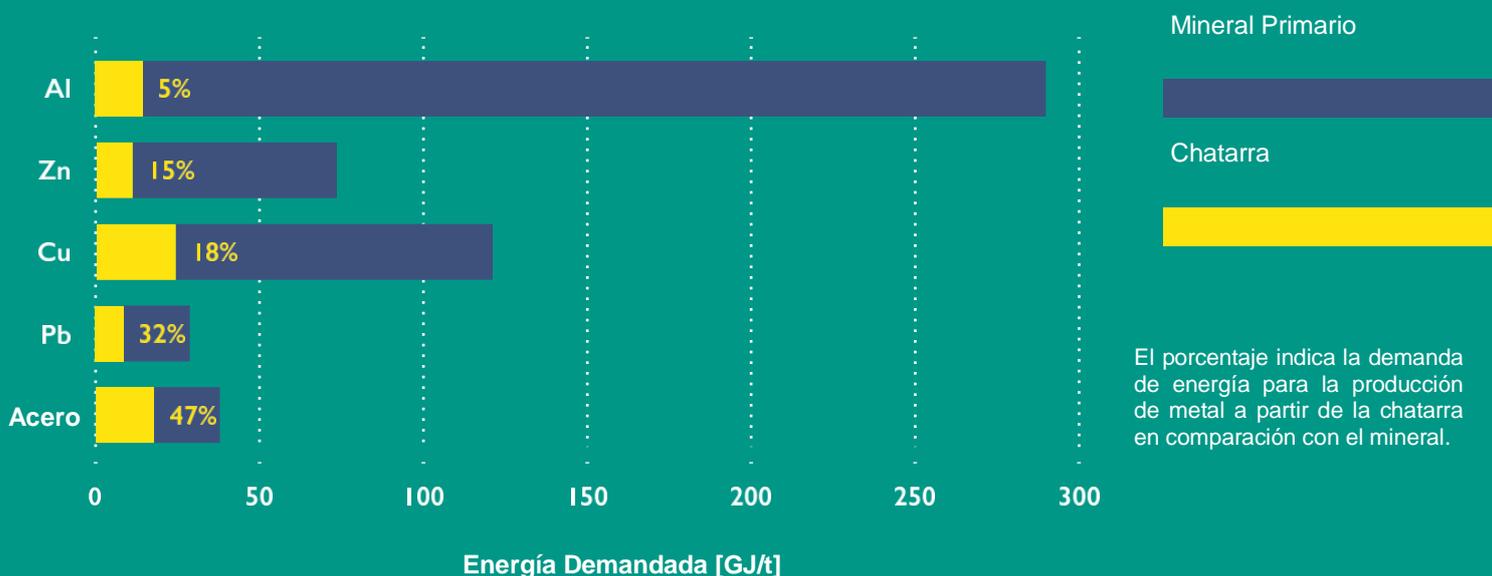
En muchos casos, el reciclaje ofrece ventajas económicas. Para varios materiales (secundarios) existe un mercado. Los precios de los productos reciclados están vinculados a los de los materiales vírgenes y, por lo tanto, están sujetos a grandes fluctuaciones debido a factores impredecibles. La Tabla 3 muestra los precios de algunos reciclados seleccionados. Es obvio que la existencia de un mercado y una demanda de materiales (secundarios) crearán un factor de atracción. En caso de que exista una demanda del mercado y exista disponibilidad de programas de reciclaje económicos, el reciclaje no necesitará ningún incentivo adicional.

Llama la atención que para varios materiales las tasas de reciclaje sean bastante bajas o virtualmente cero..

En 2011, el PNUMA informó que la tasa de reciclaje al final de su vida útil de todos los elementos importados es inferior al 1%<sup>25</sup>. Además, el As, B, Bi, Li, Sr, Te y Zr se reciclan a menos del 1%. En cuanto a la importancia y la disponibilidad limitada de algunos de estos elementos, una mayor tasa de reciclaje podría ayudar a reducir la dependencia de Europa de estos materiales.

Finalmente, el reciclaje puede mostrar distintos beneficios ambientales. Se ha mencionado anteriormente que el reutilización de aluminio no es una cuestión de escasez sino una necesidad económica. Sin embargo, los minerales que contienen aluminio (bauxita) son bastante abundantes pero el procesamiento produce grandes cantidades de desechos. Dependiendo de la calidad de la bauxita por cada t de Aluminio se generan aproximadamente 1,5 t de lodo rojo. Dado que el lodo rojo contiene cantidades considerables de hidróxido de hierro III e hidróxido de sodio altamente alcalino, representa un grave problema ambiental. Como su procesamiento es bastante caro, con frecuencia es desechado.

Fig. 4 | Demanda de energía (en GJ / t) para la producción de metales a partir de minerales primarios y chatarra



# Selección de precios de materiales reciclados (octubre 2014) para el Reino Unido

Por lo tanto, el reciclaje de aluminio no es solo una cuestión de ahorro de energía, sino que también muestra claros beneficios ambientales, ya que se pueden evitar grandes cantidades de desechos.

Por último, el reciclaje puede basarse en un marco legal como las tasas de reciclaje vinculantes en Europa.

En resumen, el reciclaje tiene sentido por las siguientes razones:

1. Protección del medio ambiente (menor consumo de recursos, menor generación de residuos, menor consumo de energía, etc.)
2. Ventajas económicas (precios elevados para materiales reciclados, ahorro de energía cara, reducción de la dependencia de las importaciones, evitación de costes de eliminación, etc.)
3. Requisitos legales (permiso para traslado de envases y residuos reciclados, etc.)

De los puntos 1 y 2 no son independientes entre sí. Como se mencionó, el ahorro de energía presentará ventajas tanto económicas como ecológicas. Sin embargo, si los tres puntos están alineados, lo más probable es que se produzca el reciclaje. Por lo general, se producirán problemas si los puntos 1 a 3 llegan a conclusiones contradictorias. El reciclaje puede ser una necesidad legal y mostrar beneficios ambientales, pero podría resultar demasiado caro.

VIDRIO (CORTADO)	€/t
Transparente	39
Ámbar	31
Verde	18
Combinados	14

PLASTICOS (BOTELLAS)	€/t
HDPE (natural)	537
HDPE (mezclados)	185
PET (transparente)	274
PET (color)	78

METALES	€/t
Latas Aluminio	1,016
Latas Acero	179
Latas Mezcladas	170
Desechos de hierro (4C grados)	164
Alambre de cobre brillante	5,053
Baterías de plomo	591

PAPEL	€/t
Papel y cartón mezclados	72

# Dilución

Generalmente, las razones de los altos costos en la producción de materiales pueden ser:

1. los elementos deben derivarse de minerales bastante diluidos,
4. explotación en condiciones severas (profundidad extrema, etc.) y / o
5. proceso de producción complejo.

Los tres puntos aumentarán la demanda de energía y en paralelo los costes. La figura 5 demuestra que existe una fuerte relación lineal entre el precio del material y la intensidad energética requerida para su producción. La intensidad energética es la energía necesaria para producir un material a partir de su forma bruta, por unidad de masa de material producido. Esta relación es válida para materias primas (Ej. Metales, óxidos) así como para productos (simples) (Ej. Ladrillos). Los materiales que demandan una gran cantidad de energía para producirse son bastante caros como el Pt, Au o Pd. A la inversa, los materiales serán bastante baratos si el consumo de energía es considerablemente bajo, como el hormigón o los ladrillos.

Está claro que la energía reportada y la demandada de está relacionadas a las tres razones mencionadas anteriormente.

Es obvio que la dilución representa un parámetro crítico. Como se mencionó anteriormente, una cierta fracción de materiales se “pierde” debido a la disipación. Los materiales se dispersan en el medio ambiente y las concentraciones son demasiado bajas. Ninguna operación de recuperación es factible. Este efecto predominante de la dilución se demuestra en la Figura 6, que muestra la concentración de elementos seleccionados en el agua de mar. Como están presentes cantidades considerables de Mg y en particular de Na y Cl, está bien establecido derivar la sal común del agua de mar. En la década de 1920, el químico alemán y ganador del premio Nobel (otorgado en 1919) Fritz Haber intentó extraer oro del agua de mar, pero concluyó que debido a la baja concentración no es rentable.<sup>27</sup> Como la concentración de uranio es mayor en el factor de mil se ha propuesto utilizar el mar como fuente. En 1983 Bernard Cohen afirmó que los reactores de producción operados con

uranio derivado del agua de mar representan una fuente de energía barata y renovable. Sin embargo, hoy en día el uranio de la minería se utiliza casi en su totalidad como combustible para centrales nucleares.

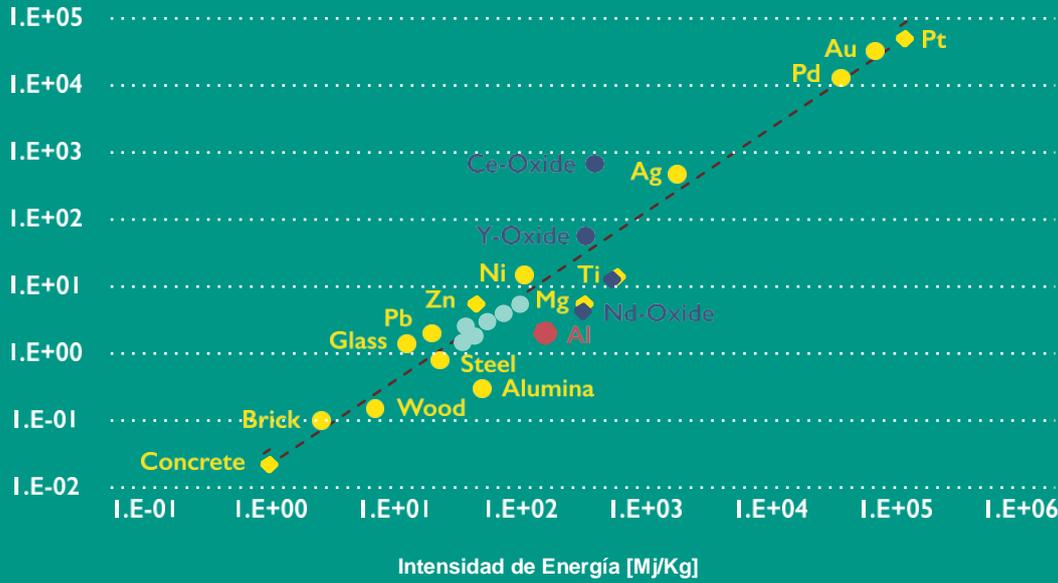
La importancia de la dilución no solo es relevante cuando se obtienen materiales de minerales primarios. Las reglas son las mismas para los recursos secundarios. Los metales que presentan una baja concentración en los productos y que se encuentran aguas abajo en las corrientes de desechos muestran una tasa de reciclaje bastante baja.<sup>30</sup>



Fig. 5

# Precio del material en función de la intensidad energética.

Precio del Material [US\$/Kg.



Gutowski et al. 2013

<http://www.metal-pages.com/>

Plásticos de acuerdo a Gutowski et al.2013

Mahfoud & Emadi 2010

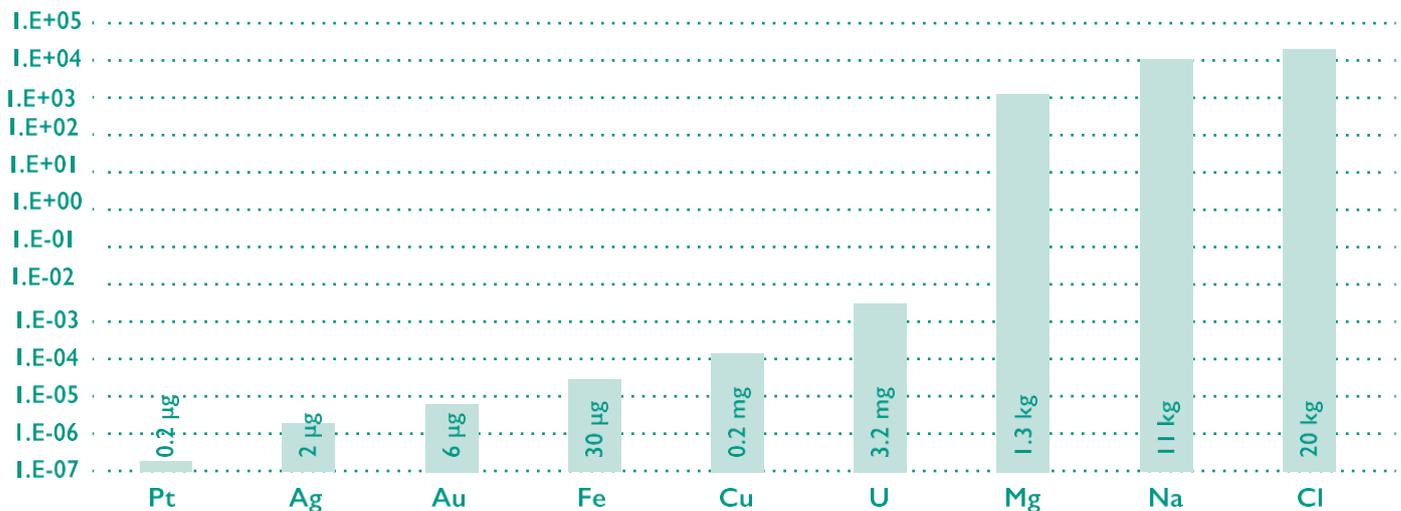
(Energía necesaria para producir un material a partir de su forma bruta, por unidad de masa de material producido).

Fuente: Mahfoud y Emadi, 2010<sup>19</sup> y Gutowski et al, 2013<sup>26</sup>

Fig. 6

# Concentraciones de elementos seleccionados en agua de mar

Concentración [g/m<sup>3</sup>]



Fuente: Hachi, 2004<sup>29</sup>.

# Indicadores

Para comparar diferentes procedimientos de reciclaje se requieren indicadores. Sin embargo, no hay sentido común sobre qué indicadores deben usarse. La Tabla 4 muestra diferentes posibilidades para evaluar los procesos de reciclaje. La clasificación representa un enfoque más cualitativo. Por ejemplo, no está claro a priori qué grado de procesamiento es óptimo. Tampoco está claro cómo cuantificar la calidad de un material y, por tanto, cómo calcular un valor para la eficiencia de la calidad.

Sin embargo, los indicadores no solo son necesarios para comparar diferentes programas de reciclaje, sino también para comparar el reciclaje con otras opciones. Sin duda, el reciclaje presenta varios beneficios, pero hay

buenas razones para privilegiar la recuperación energética<sup>31</sup>.

Parece bastante fácil utilizar la eficiencia de los recursos como criterio para evaluar las opciones de gestión de residuos, como el reciclaje o la incineración. Sin embargo, también existe una amplia variedad de indicadores para la eficiencia de los recursos.<sup>32</sup> Como señalaron Allwood et al.<sup>33</sup>, la eficiencia de los materiales compete con la eficiencia energética.

Para obtener una mejor imagen de los impactos del uso de los recursos y los beneficios de la eficiencia de los recursos, se ha sugerido utilizar cuatro áreas clave de impacto: material, agua, uso de la tierra y carbono como se muestra en la Figura 7.<sup>34, 35, 36</sup>

Cabe señalar que todos los indicadores adoptan una perspectiva de ciclo de vida.<sup>35</sup> La Tabla 5 ilustra el conjunto sugerido para dos niveles de ejemplo: el nivel de producto y el nivel nacional.<sup>35</sup>

Lang-Koetz et al.<sup>36</sup> concluyeron que, debido al tema complejo y complicado, es difícil encontrar estimaciones cuantitativas para la entrada de recursos y los potenciales de eficiencia de recursos.

Es evidente que la evaluación del consumo de recursos no es una tarea sencilla y en la literatura se encuentran disponibles varios métodos que se resumen en la Tabla 6.

## Tab. 4 | Indicadores para evaluar la eficiencia del reciclaje

### (A) CONSIDERANDO EL GRADO DE PROCESAMIENTO

Reciclaje del producto	Se mantiene la constitución química y física de un material
Reciclaje del Material	La constitución física es destruida, pero no la química
Reciclaje del Materias Primas	Tanto la constitución física como la química es alterada

### (B) CONSIDERANDO EL PROCEDIMIENTO DE ASIGNACIÓN

Reciclaje del Ciclo cerrado	Reciclado en el mismo producto No se producen cambios en las propiedades inherentes
Reciclaje del Ciclo abierto	Reciclado en otro sistema producto El material experimenta un cambio en sus propiedades inherentes

### (C) CALCULANDO LA EFICIENCIA DE ACUERDO A UNA FORMULA (SEMEJANTE A LA FORMULA R<sub>i</sub> DE RECUPERACION DE ENERGIA)

Eficiencia del Material	La corriente de salida es correlativa a la corriente de entrada
Eficiencia del la Energía	El consumo de energía es correlativo a la corriente de salida
Eficiencia del la Calidad	Pone en correlación la calidad del flujo de salida con la del material virgen

# Indicadores de recursos según la Oficina Europea de Medio Ambiente



Fuente: Beasley y Georgeson, 2014<sup>36</sup>

Tab. 5

## Sistema sugerido para indicadores de uso de recursos sobre el producto a nivel nacional

RECURSOS USO CATEGORÍA		NIVEL DEL PRODUCTO		NIVEL NACIONAL	
Materiales	Biótico	Carga material de los productos	Biótico	Indicadores de los países basados en el flujo de materiales (incluidos los materiales incorporados en las importaciones y exportaciones)	Biótico
	Abiótico		Abiótico		Abiótico
Agua		Carga de agua / Huella hídrica del producto	Carga de agua /Huella hídrica de los países (Incluidos los países importadores y exportadores)		
Superficie de tierra		Uso real de superficie del producto	Uso real de superficie de los países (Incluidos los países importadores y exportadores)		
Emisiones de GEI		Huella de carbono del producto	Emisiones nacionales de GEI (Incluidos los GEI incorporados en las importaciones y exportaciones)		

Fuente: Gilium et al, 2009.<sup>35</sup>

Sin embargo, está bien establecido el uso de LCA, que es una abreviatura de "Evaluación del ciclo de vida" o "Análisis del ciclo de vida", pero también se denomina "Análisis de la cuna a la tumba". El ACV es una técnica para evaluar los impactos ambientales asociados a un producto a lo largo de todas las etapas del ciclo de vida. Para realizar un ACV se deben respetar una serie de estándares. La Tabla 7 muestra los estándares relevantes de la Norma ISO 14000. Incluso si el LCA es una herramienta eficiente, las desventajas de su uso son obvios, como se enumera a continuación.

1. El método requiere mucho tiempo y es costoso.
2. Un conocimiento especializado es indispensable.
3. Establecer las desventajas del sistema es hasta cierto punto subjetivo y dificulta las comparaciones. Los límites pueden incluir de la cuna a la tumba, de la cuna a la cuna, de la cuna a la puerta o de la puerta a la puerta, mientras que el ajuste fino de las desventajas es confuso.
4. ACV se volverá extremadamente complejo al evaluar la fase de final de vida y más allá. Los productos al final de su vida útil pueden contener numerosos materiales y contaminantes. El modelo en cascada muestra que el reciclaje, la recuperación y la eliminación pueden aplicarse simultánea y repetidamente a ciertos componentes de un producto.

5. No existe un método de ponderación de evaluación de impacto generalmente aceptado.

6. El LCA depende de los datos. Puede haber incertidumbres en los datos. Con frecuencia faltan datos comparables y fiables.

7. Existen dificultades para aplicar LCA a nuevos diseños de procesos.

8. Los ACV no incluyen impactos sociales y aceptación, precios, agendas políticas o regulaciones.

9. ACV nunca da una respuesta clara, requiere interpretación.

Resumiendo se puede concluir que una evaluación detallada de los procesos de reciclaje y sus alternativas (reutilización, incineración) es fundamental. Hay diferentes herramientas disponibles. El LCA es una herramienta de uso común que presenta varias ventajas, pero también presenta importantes inconvenientes. En particular, los LCA para modelos en cascada con numerosas etapas de uso son extremadamente complejos. Como describen Christensen et al.<sup>47</sup>, la definición de los límites del sistema para los modelos en cascada exhibe consecuencias dramáticas. Sin embargo, en particular para la industria forestal, existe una falta de límites específicos.

Como todas las cascadas (de materiales a base de carbono) terminan con un paso de recuperación de energía, debe señalarse que cualquier comparación de impacto entre el reciclado de materias primas secundarias y la extracción de nuevas materias vírgenes se hará sobre la base del costo y los impactos para extracción y producción únicamente. Como la recuperación de energía tendrá lugar en cualquier caso, no debe incluirse en ese cálculo.

**Tab. 6 | Posibles indicadores para la evaluación del impacto ambiental de los productos y servicios**

ABREVIACIONES	DESCRIPCIÓN	REFERENCIAS
AFM o AFS	Análisis de Flujo de Materiales o Análisis de Flujo de Sustancias	18
DEA	Demanda de energía acumulada	38
EMUS	Entrada de material por unidad de servicio	39
AEE	Análisis Estadístico de entropía	40, 41
IPS	Índice de proceso sostenible	42, 43
HE	Huella Ecológica	44, 45, 46

Tab. 7 | **Las Normas de la serie ISO 14000**

NORMAS	EDICIÓN	TÍTULO
ISO 14001 (Corrección Técnica I)	11/2004 (07/2009)	Sistemas de Gestión Ambiental - Requisitos con indicaciones para su aplicación
ISO 14004	11/2004	Sistemas de Gestión Ambiental - directrices generales sobre principios, sistemas y técnicas de apoyo
ISO 14005	10/2010	Sistemas de Gestión Ambiental - directrices para la fase de implementación de un sistema de gestión ambiental, incluyendo una evaluación de desempeño ambiental.
ISO 14015	11/2001	Gestión Ambiental - Evaluación ambiental de sitios y organizaciones (EASO)
ISO 14020	09/2000	Etiquetas y Declaraciones ambientales – Principios generales
ISO 14021 (Corrección )	09/1999 (12/2011)	Etiquetas Ecológicas y declaraciones ambientales. Afirmaciones ambientales autodeclaradas (Etiquetado ambiental Tipo II )
ISO 14024	04/1999	Etiquetas Ecológicas y declaraciones ambientales. Principios y procedimientos (Etiquetado ambiental Tipo I )
ISO 14025	07/2006	Etiquetas Ecológicas y declaraciones ambientales. Principios y procedimientos (Etiquetado ambiental Tipo III )
ISO 14031	08/2013	Gestión Ambiental - Evaluación de desempeño ambiental - Directrices
ISO 14040	07/2006	Gestión Ambiental — Análisis del ciclo de vida — Principios y marco de referencia
ISO 14044	07/2006	Gestión Ambiental — Análisis del ciclo de vida — Requisitos y directrices
ISO/TR 14047	06/2012	Gestión Ambiental — Análisis del ciclo de vida — Ejemplos ilustrativos sobre cómo aplicar ISO 14044 a situaciones de evaluación de impacto
ISO/TS 14048	04/2002	Gestión Ambiental — Análisis del ciclo de vida — Formatos de documentación de datos.
ISO/TR 14049	06/2012	Gestión Ambiental — Análisis del ciclo de vida — Ejemplos ilustrativos sobre cómo aplicar ISO 14044 para la definición de alcances y objetivos y el análisis de inventario.
ISO 14050	02/2009	Gestión Ambiental — Vocabulario

## El Modelo de cascada

El concepto de utilización en cascada tiene su origen en el campo de la biomasa. Según Arnold et al. Existen tres posibilidades para el uso de recursos renovables<sup>48</sup>:

1. Utilización de subproductos y productos conjuntos.
2. Paralela utilización de productos (energía y material).
3. Utilización en cascada.

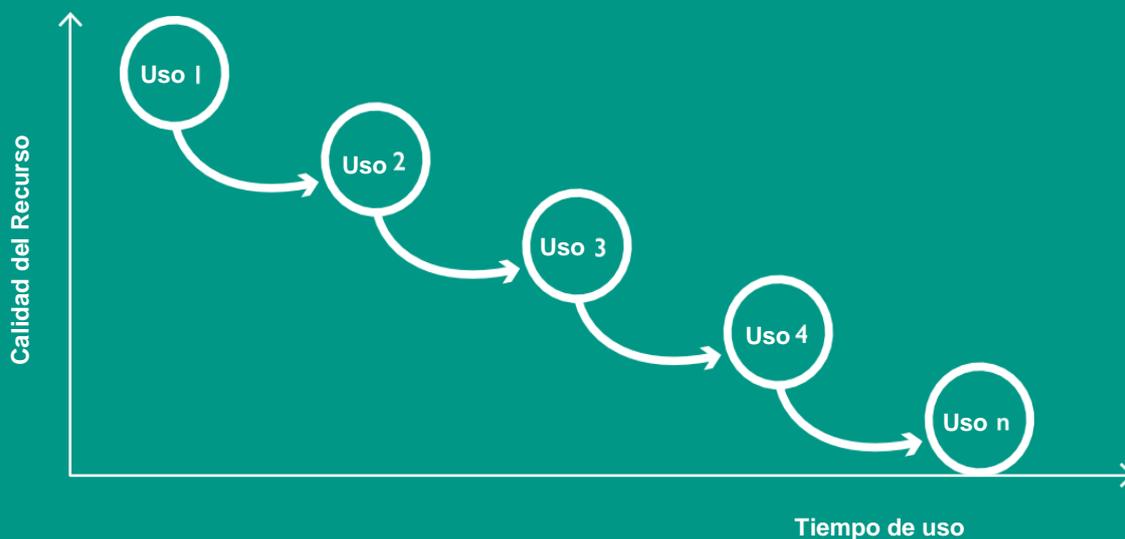
En este contexto, la utilización en cascada se define como el uso secuencial de materias primas biogénicas para producir materiales y energía<sup>48</sup>. El concepto de cascada de recursos puede compararse con un río que fluye sobre una secuencia de caídas, como se muestra en la Figura 8. El agua cae de un nivel a otro hasta que alcanza el nivel más bajo de la cascada.



Imagen de Valorsul

La transferencia del concepto de cascada de una caída de agua al uso de un recurso se muestra en la Figura 9. Se produce un uso repetido que va decreciendo en el tiempo el recurso.

## Higo.8 | Concepto de cascada mediante el uso repetido de un recurso de calidad decreciente



## Fig. 9 | La cascada en su camino hacia el equilibrio



Imagen de Skoeber

En cada utilización adicional debe considerarse una disminución de la calidad. Sin embargo, a medida que el recurso atraviesa varias fases, el uso general de los recursos se reduce significativamente. También se presentan diferentes posibilidades para las cascadas.

En 1992 Janicki et al. utilizó “Material en Cascada” para reprocessar piezas de plástico rechazadas (poliestireno, policarbonato) durante el moldeo por inyección mediante la definición de un método para utilizar triturados.<sup>50</sup>

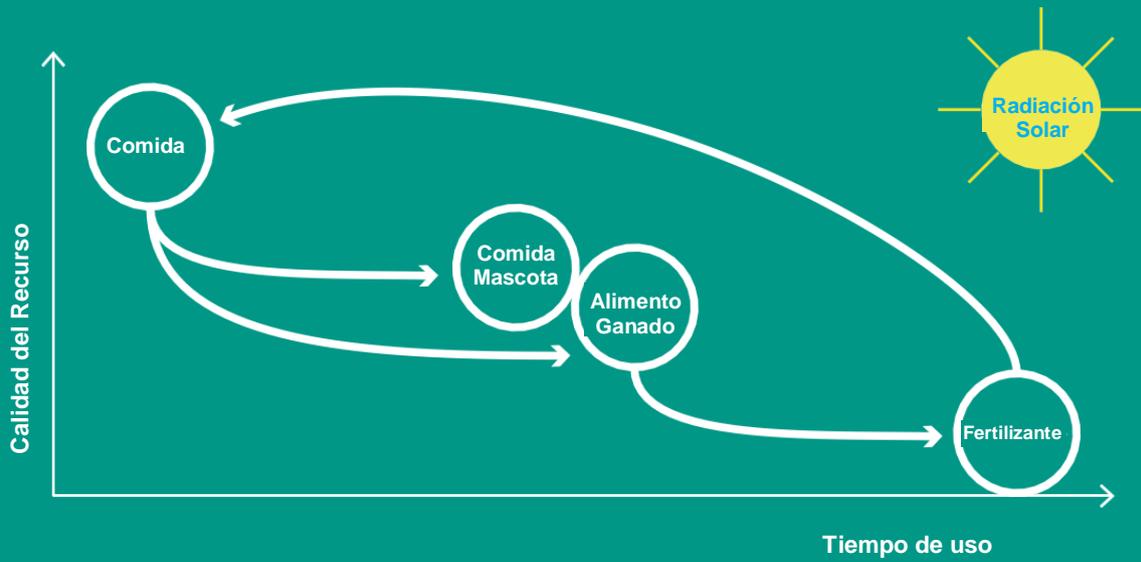
Tanto los materiales biogénicos como los plásticos están compuestos básicamente de carbono y, por lo tanto, como último paso (es decir, si el nivel de calidad ya no es aceptable) la recuperación de energía y / o el compostaje terminan idealmente la cascada.

La cascada de recursos simple como se muestra en la Figura 9 solo conoce una forma. La economía de recursos se logra mediante la utilización gradual de los recursos, comenzando en el nivel más alto posible hasta que el recurso se agota por completo (con frecuencia se utiliza térmicamente). Sin embargo, en contraste con el ejemplo de las cascadas de agua, una cascada de recursos no debe ser necesariamente una caída de un solo sentido. La Figura 10 esboza una cascada de biomasa tal como se ha producido en las zonas rurales durante siglos.

Los alimentos se cultivan en los campos y en un primer paso es utilizado para la preparación de comidas. Los desechos de cocina de la mejor calidad se alimentan primero a las mascotas domésticas. Los alimentos que no pueden ser consumidos por las mascotas, se alimentan a otros animales como cerdos o gallinas. Finalmente, el abono de pollo y cerdo se utiliza posteriormente como fertilizante. Sin embargo, el fertilizante no se pierde. Con la ayuda de la energía solar, se recircula nuevamente hacia una nueva cascada de alimentos. Así, la cascada se convierte en un proceso cíclico.

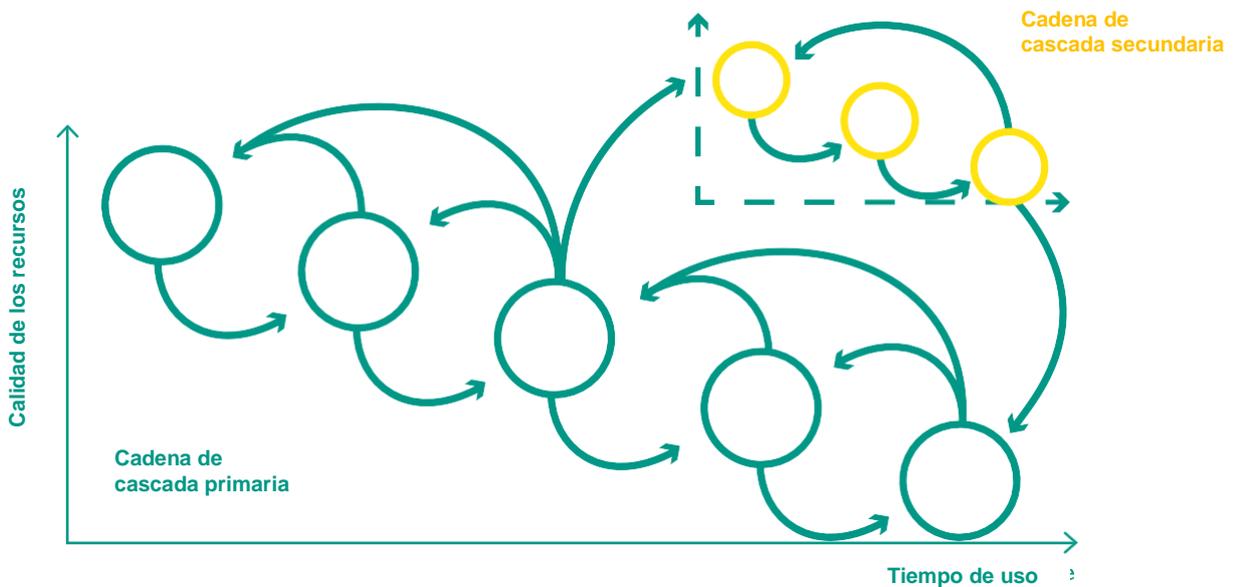
Sirkin y Houten<sup>49</sup> introdujeron el término capacidad de recuperación de recursos. Los autores asumen que la economía de recursos también puede obtenerse mediante el rescate y la recirculación de la calidad de los recursos a niveles más altos de la cascada (de forma similar a como la radiación solar ayudará a recircular el fertilizante en la cascada de alimentos). La recuperabilidad se refiere al grado en que se pueden recircular las cualidades de recurso de una sustancia, material o producto. Una vez más, el concepto de cascada se convierte en un proceso cíclico. Sirkin y Houten<sup>49</sup> sugirieron el término cadena en cascada para expresar el comportamiento cíclico. Además, los autores señalan que la salvación de la calidad de los recursos no se restringe a los límites de la cadena de cascada primaria, sino que puede conmutarse a cadenas de cascada secundarias (e incluso más) como se ilustra en la Fig. 11.

Fig. 10 | Cascada de la calidad nutricional



Fuente: Sirkin y Houten, 1994.<sup>49</sup>

Fig. 11 | La cadena de cascada y la salvabilidad



El grado en que la calidad de un recurso puede ser recirculada, regenerada o reprocesada

Fuente: Sirkin and Houten, 1994.<sup>49</sup>

# Eficiencia del reciclaje: Tres casos modelo

## Introducción

Se han evaluado en detalle los siguientes tres tipos de materiales:

- Madera / celulosa
- Hierro y acero
- Polietileno / polipropileno

Estos materiales se comercializan en grandes volúmenes, representan grandes valores comerciales, son manejados por el sector de gestión general de residuos y ya presentan tasas de reciclaje relativamente altas. La Figura 12 compara la producción anual de los materiales seleccionados (columnas azules) con los productos importantes (en  $\text{t y m}^3$ ).

## Madera/Celulosa

Anualmente se irradian a la tierra alrededor de  $5.7 \cdot 10^{24}$  J de energía solar. Las plantas y otros organismos fotosintéticos (bacterias) utilizan alrededor de  $3 \cdot 10^{21}$  J (es decir, 0,05% de la energía solar total disponible) para convertir  $\text{CO}_2$  en biomasa.<sup>56</sup> El proceso básico de las plantas para producir carbohidratos es la fotosíntesis de acuerdo con la Ecuación 1 y posteriormente la celulosa es el producto final.

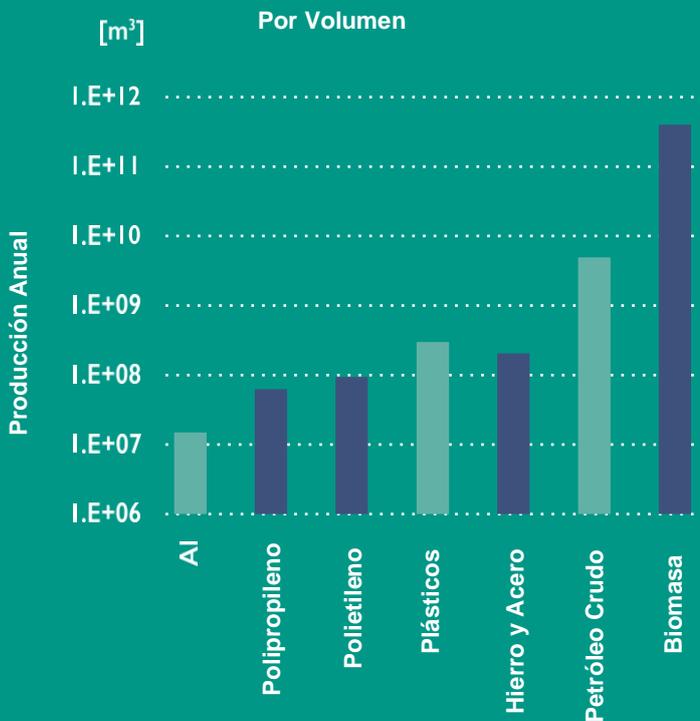
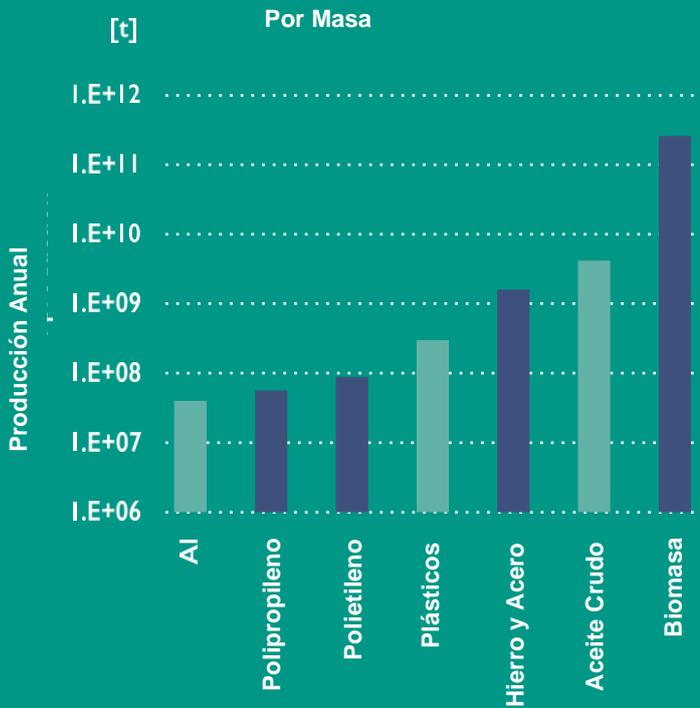
Incluso, si la eficiencia de la fotosíntesis es bastante baja, la producción primaria neta global (NPP) se estima en 105.109 t de carbono al año.<sup>55</sup> Considerando la formación de carbohidratos (Ecuación 1), un total de aproximadamente 260.109 t de biomasa se produce cada año. Esto es

varios pedidos de magnitud mayor que en comparación con el hierro y el acero ( $1,6 \cdot 10^9$  t) o el aluminio ( $40 \cdot 10^6$  t). Suponiendo además un valor calórico de 15 GJ / t, la energía total disponible de la biomasa es aproximadamente  $2.5 \cdot 10^{21}$  J. Sin embargo, solo alrededor del 10% de la biomasa está potencialmente disponible para procesos técnicos, lo que limita el potencial de utilización de energía a aproximadamente  $0,25 \cdot 10^{21}$  J. Por lo tanto, la utilización de toda la biomasa disponible podría teóricamente (eficiencia del 100%) cubrir solo alrededor del 50% de la demanda anual de energía global ( $0.5 \cdot 10^{21}$  J en 2010).<sup>57</sup> Es obvio que la biomasa es un producto escaso y debe utilizarse principalmente como material y solo en segundo lugar como fuente de energía.

## Ecuación 1



# Tasas de producción anual de materiales seleccionados



Al para 201351; PE, PP y plásticos (incluidos PE y PP) para 201352; hierro y acero para 201353; petróleo crudo para 201454; promedio de la biomasa de 1982 a 199055; para el cálculo de los volúmenes se han utilizado las siguientes densidades: Al: 2.700 Kg/m³; Polipropileno: 900 Kg/m³; Polietileno: 9.500 kg/m³; Plásticos: 1.000 Kg/m³; Hierro y acero: 7.800 Kg/m³; Petróleo crudo: 850 Kg/m³; Biomasa: 650 Kg/m³

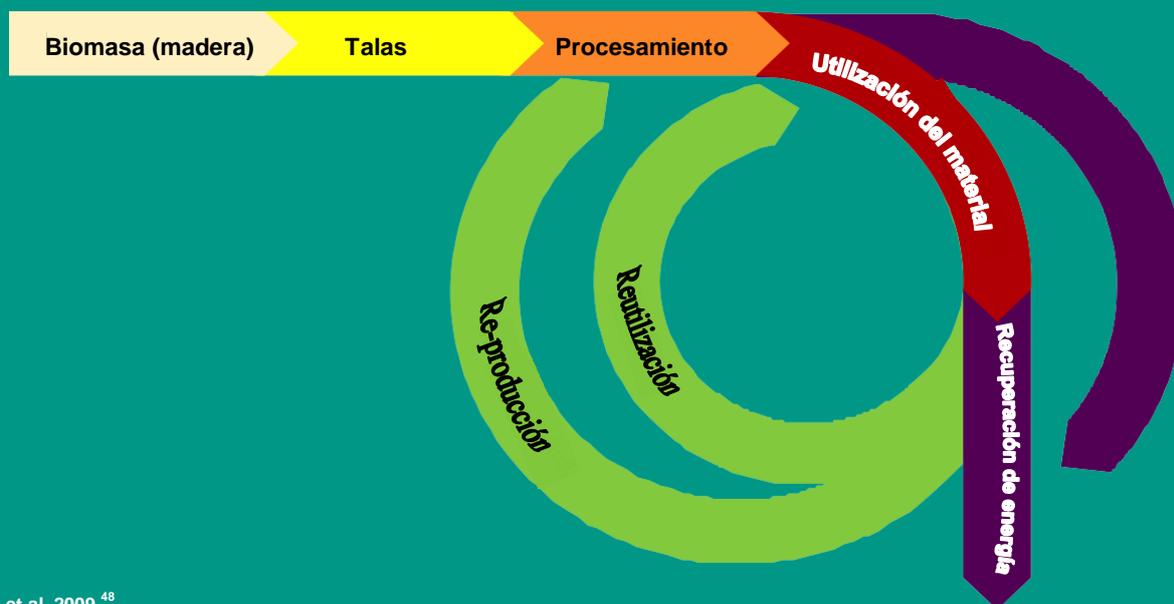
Un producto de gran importancia es la madera, que es un tejido estructural fibroso y duro que se encuentra en los tallos y raíces de los árboles y otras plantas leñosas. Básicamente está compuesto por celulosa (40 - 50%), hemicelulosa (15 - 25%) y lignina (15 - 30%). Se ha utilizado durante miles de años tanto como combustible como material de construcción. Como se muestra en la Figura 13, la madera debe usarse preferiblemente en cascada.

El cuadro 8 muestra la utilización de madera en bruto en Alemania. La utilización de materiales contribuyó a alrededor del 70% (64,4 millones de m³). En particular, la madera de baja calidad (por ejemplo, madera de desecho) se utiliza más bien para la generación de energía.

Los datos de la Tabla 8 no dan ninguna indicación de cascada. Sin embargo, la cascada de madera presenta grandes beneficios medioambientales. Según Sirkin y Houten<sup>49</sup> y Fraanje<sup>58</sup>, la cascada de madera de pino prolonga sustancialmente la absorción de carbono para mitigar el cambio climático. La figura 14 muestra una posible cascada de madera de pino que se realiza en la práctica en los Países Bajos. La cascada total de madera de pino cubre 7 etapas de utilización que podrían ampliarse a más de 350 años<sup>58</sup>. Sólo recientemente se ha demostrado que =] la cascada generó ahorros de hasta el 14% del suministro anual de madera primaria<sup>59</sup>.

La cascada de madera ya se utiliza ampliamente. Como muestra ventajas considerables, debe aplicarse siempre que sea posible. Las cascadas pueden ser bastante complejas, en particular cuando se implementan cadenas de cascada secundarias (por ejemplo, producción de fibra de celulosa). Como el producto final después de la última cascada (es decir, incineración) es el CO2, que es el crudo material para la fotosíntesis, la cascada no es una ruta unidireccional sino un proceso de ciclo.

# Utilización múltiple de la biomasa (madera) en cascada



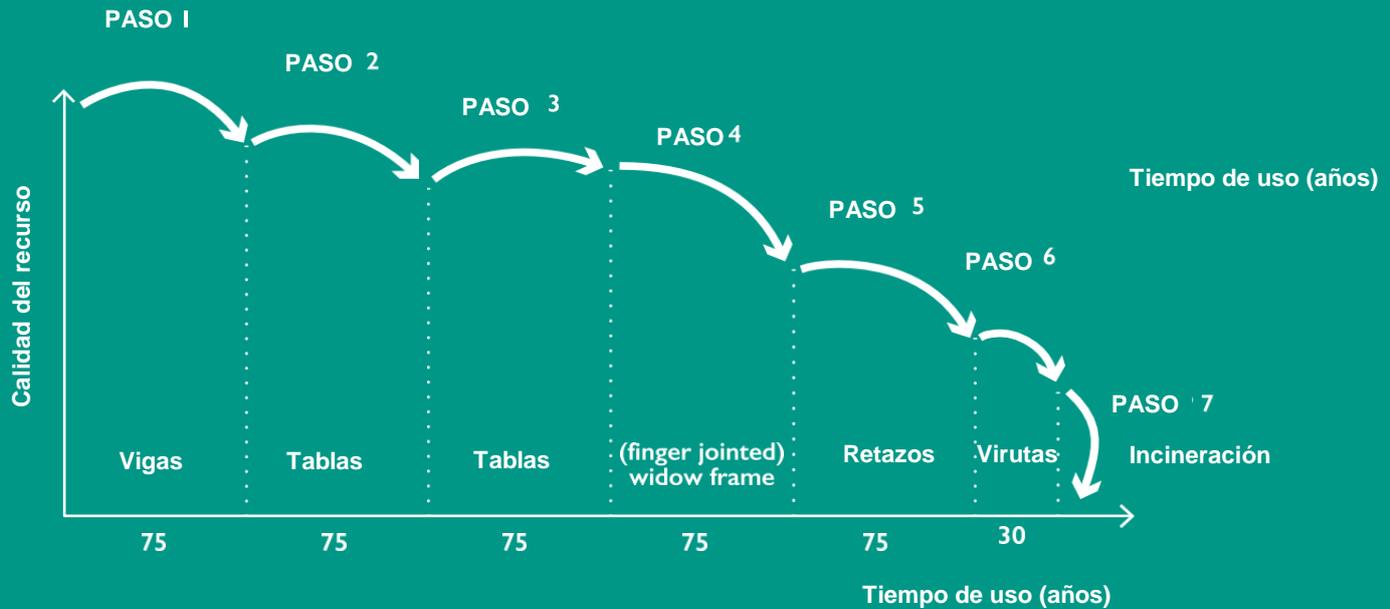
Fuente: Arnold et al, 2009.<sup>48</sup>

Tab. 8 | Utilización de madera en bruto en Alemania en el 2004 en [Millones de m<sup>3</sup>]

VARIEDAD DE MATERIALES DE LA TEMPORADA	VOLUMENES DE MATERIA PRIMA	LIGNINA PRIMARIA	MADERA RE-CONSTITUIDA	INDUSTRIA ASERRADERA	OTROS MATERIALES USADOS	UTILIZACIÓN ENERGÉTICA		
						(>1MW) INSTALACIONES	(< 1 MW) INSTALACIONES	COMBUSTIBLE DOMESTICO
Leña	33.6	-	-	33.3	0.3	-	-	-
Madera industrial	21.0	5.2	10.0	0.1	0.2	0.2	-	5.4
Restos de madera del bosque /madera pequeña	7.1	-	-	-	-	-	1.2	5.4
Producto para Aserraderos	11.8	3.3	5.9	0.2	0.3	1.3	0.4	0.4
Corteza	2.4	-	-	-	1.6	0.5	0.3	-
Otros residuos industriales de madera	4.1	-	0.9	-	0.1	2.8	0.4	-
Desechos de madera	11.0	-	2.6	-	0.3	5.8	1.2	1.2
Madera de paisajes en conservación	0.3	-	-	-	-	0.2	0.1	-
Suma	-	8.5	19.4	33.6	2.7	11.3	3.6	12.3
Total	91.4			64.2			27.2	

Fuente: Arnold et al, 1994 2009.<sup>48</sup>

# Posible cascada de caña de paja



Fuente: Fraanje, 1997.58

## Polietileno de baja densidad

Los plásticos juegan un papel importante hoy en día, son tan comunes que ahora se dan por sentado. Básicamente, los plásticos se producen a partir de petróleo crudo y, por lo tanto, no son sostenibles. Sin embargo, la proporción de plásticos en comparación con la producción total de petróleo crudo es bastante baja como se muestra en la Figura 15. En 2013, la producción mundial de petróleo fue de 4.540 millones de toneladas, que se utilizó principalmente para fines energéticos como calefacción o transporte.

El polietileno es un polímero termoplástico del grupo Poliolefina. El polímero fue desarrollado por la empresa británica ICI y patentado en la década de los 30s basado en una polimerización a alta presión (> 1500 bar) y alta temperatura (150 - 250 ° C) que da lugar a cadenas poliméricas ramificadas y una relativa baja densidad (LDPE). Posteriormente, el químico alemán K. Ziegler<sup>61</sup> desarrolló una ruta alternativa para temperatura moderada (80 - 90 ° C) y presión (1 - 10 bar). La polimerización, para la que es fundamental un catalizador, conduce a cadenas poliméricas lineales y, por tanto, a un polímero de alta densidad (HDPE). El mismo proceso se puede utilizar agregando una cierta fracción de otro monómero (por ejemplo, butileno, penteno, etc.) dando lugar a cadenas laterales bien definidas, el llamado polietileno lineal de baja densidad (LLPDE).<sup>62</sup>

Fig. 15 Producción de plástico (en millones de t) comparada con el total de petróleo crudo, año 2013



Fuente: Plásticos Europeos, 2015.<sup>52</sup> y Fenton, 2015.<sup>54</sup>

# Polipropileno

Polipropileno también es un polímero termoplástico del grupo Poliolefina. La patente de Ziegler<sup>61</sup> mencionaba solamente el polietileno pero ninguna otra poliolefina. Durante este período, Ziegler colaboró con el equipo de G. Natta, que contó con el apoyo de la empresa italiana Montecatini. Gracias a esta cooperación, Natta recibió los datos detallados de los catalizadores utilizados por Ziegler y los utilizó para la síntesis de polipropileno que fue registrado para la aprobación de patentes en Italia.<sup>63, 64</sup> Como resultado, se produjeron décadas de disputas legales y grandes incertidumbres sobre los derechos de licencia existentes. No fue hasta 1978 cuando a Ziegler se le otorgó la Patente en los Estados Unidos para el Polietileno.<sup>65</sup>

Como molécula de propeno es asimétrica, el polipropileno puede presentarse en diferentes configuraciones estereoquímicas donde, las más importantes se muestran en la Tabla 9. El tipo más común de polipropileno es la configuración isotáctica (iPP) que muestra una cristalinidad relativamente alta (60 a 70%). Por tanto, iPP presenta la mayor resistencia en el módulo E de todos los tipos de PP. Su cristalinidad de PP sintáctico es significativamente menor (30 a 40%) y por lo tanto muestra propiedades altamente transparentes y flexibles. El PP atáctico completamente amorfo es un sólido ceroso y ligeramente pegajoso.

El polietileno y el polipropileno se polimerizan a partir del monómero etileno o propileno, que suele ser una materia prima a base de petróleo. Sin embargo, el etileno también puede derivarse del etanol mediante la fermentación del azúcar material renovable. El proceso de base biológica se conoce desde la década de 1940, pero nunca se utilizó a escala industrial. El petróleo y el polietileno de base biológica son indistinguibles y no biodegradables.<sup>67</sup> La Tabla 10 muestra el consumo de energía y la generación de residuos sólidos para la producción de polietileno (HDPE y LDPE). Aproximadamente se puede estimar que para 1 t de PE se requieren alrededor de 2 t de aceite, mientras que la mitad se usa como materia prima y la otra mitad para energía.

El polietileno es el polímero que se produce con más frecuencia y contribuye aproximadamente al 40% de la demanda de material termoplástico y aproximadamente al 30% del material plástico total<sup>62</sup>. El polipropileno ocupa el segundo lugar entre los polímeros más extendidos. Para 2013, su mercado es de 56 millones de toneladas (es decir, el 19% del mercado total de polímeros) solo superado por el polietileno (76 millones que es el 30% del mercado total de polímeros).

En 2013, la demanda de plásticos en Europa fue 46,3 Millones de t de los cuales LDPE / LLDPE fueron 8,1 millones de toneladas (es decir, 17%), HDPE 5,6 millones de toneladas (es decir, 12%) por PP 8,7 millones de toneladas (es decir, 19%). Por tanto, cubren casi el 50% del mercado europeo 52.

## Tab. 9.1 | Tipos de polipropileno

TIPO DE POLIPROPILENO	DESCRIPCIÓN
Isotáctico (iPP)	Todos los grupos metilo se encuentran en el mismo lado de la cadena de polímeros
Sintáctico (sPP)	Todos los grupos metilo se encuentran en el lado alterno de la cadena de polímeros
Atáctico (aPP)	Todos los grupos metilo están dispuestos al azar a lo largo de la cadena de polímeros



Tab. 9.2 | **Propiedades básicas del polietileno (LDPE y LDPE)**

GRADO DEL POLIMERO	HDPE	LDPE	LLDPE	iPP
Densidad [Kg/m <sup>3</sup> ]	961.0	924.3	922.0	910
Cristalinidad [%]	67	40	40	65
Max. Temperatura de fusión [°C]	131	110	122	-
Punto de reblandecimiento VICAT [°C]	127	93	101	-
Cortas brechas	1.2	23	26	-
Resistencia a la tensión [MPa]	26.5	12.4	10.3	33
Fuerza de ruptura de la tensión [MPa]	21.1	12.0	25.3	-
Alargamiento de la ruptura [%]	906	653	811	800
Modulo de elasticidad [MPa]	885	240	199	1,300

Fuente: HUG Industrietechnik und Arbeitssicherheit, 2015.<sup>66</sup>

Tab. 10 | **Energía total, materias primas y generación de desechos sólidos por 1 kg de producto**

	ENERGÍA	RESIDUOS SOLIDOS TOXICOS	RESIDUOS SOLIDOS NO TOXICOS
HDPE	80.2 MJ	0.93 g	1.28 g
LDPE	82.9 MJ	3.06 g	2.38 g
LLDPE	79.2 MJ	0.56 g	0.84 g
iPP	77.9 MJ	2.28 g	1.84 g

Fuente: Shen et al, 2009.<sup>67</sup>

El PE se utiliza en gran medida para el envasado, mientras que esta tendencia es aún más pronunciada para el LDPE (75%) que para el HDPE (60%), como se muestra en la Figura 16. La proporción de envasado de PP es significativamente menor pero sigue siendo de gran importancia (39%). Dado que los envases suelen representar productos de corta duración, se puede suponer que una gran fracción de PE y PP puestos en el mercado llegará al final de su vida útil muy pronto y la fracción en stock (por ejemplo, utilizada para la construcción) es bastante bajo.

En 2012, 25,2 millones de toneladas de residuos plásticos post-consumo acabaron en el agua. El 62% se recuperó mediante reciclaje (26%) y recuperación de energía (36%). En general, el 38% todavía va a los vertederos.<sup>52</sup> En los países que han puesto en marcha la prohibición de los vertederos, la cantidad de plásticos depositados prácticamente llega a cero.

Como el PP y el PE son termoplásticos, pueden fundirse y reprocesarse. Sin embargo, en la práctica existen varias barreras a medida que se reduce el peso molecular se puede producir oxidación. El grado de degradación depende de la temperatura de

procesamiento y estrés mecánico.<sup>(68)</sup> Durante y después del reciclaje, la degradación termo-oxidativa del polipropileno puede controlarse mediante la incorporación de estabilizadores adecuados.<sup>69</sup>

El otro problema limitante en el reciclaje de PP y PE es la contaminación con otros materiales, plásticos y no plásticos. Existe una gran cantidad de tecnologías para separar y clasificar plásticos como:<sup>70</sup>

- Clasificación por inducción
- Separador de corrientes de Foucault
- Separador de tambor / pantalla
- Separación fregadero-flotador
- Tecnología de rayos X
- Sensor infrarrojo cercano

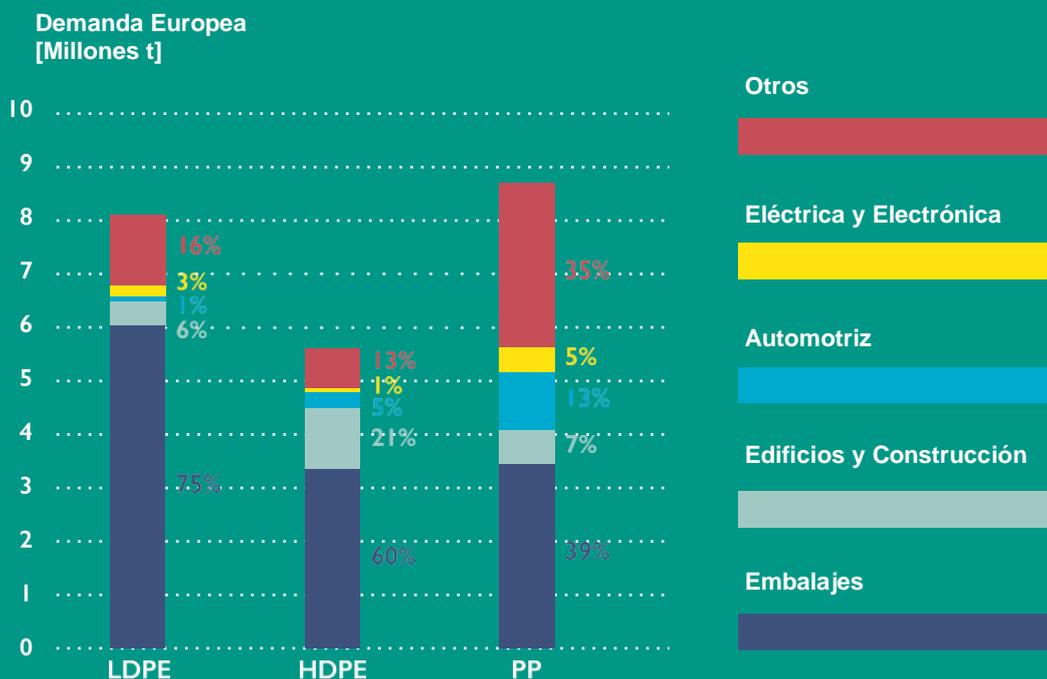
En particular, es difícil separar PP y PE ya que las densidades son bastante iguales. Para el PET se ha demostrado que el reciclaje múltiple puede reducir el impacto ambiental del reciclaje.

<sup>71</sup> Incluso en estudios comparables de PE y PP no existe un uso múltiple de estos plásticos lo cual es muy recomendable (Modelo en cascada). La Figura 17 muestra una cascada para PE y / o PP. Como hoy en día los plásticos recuperados son frecuentemente "reciclados", la cascada es bastante corta. Como señalaron Shen y Worrell<sup>70</sup>, es necesario mejorar el monitoreo y rastrear las tasas de reciclaje reales para permitir la optimización y una "cascada de calidad". El objetivo debe ser generar el mayor beneficio económico y medioambiental.

La cascada de plásticos es posible y debe terminar con un paso de incineración (lo más tarde posible). A diferencia de los materiales de base biológica como la madera, el concepto de cascada aún no está bien desarrollado.

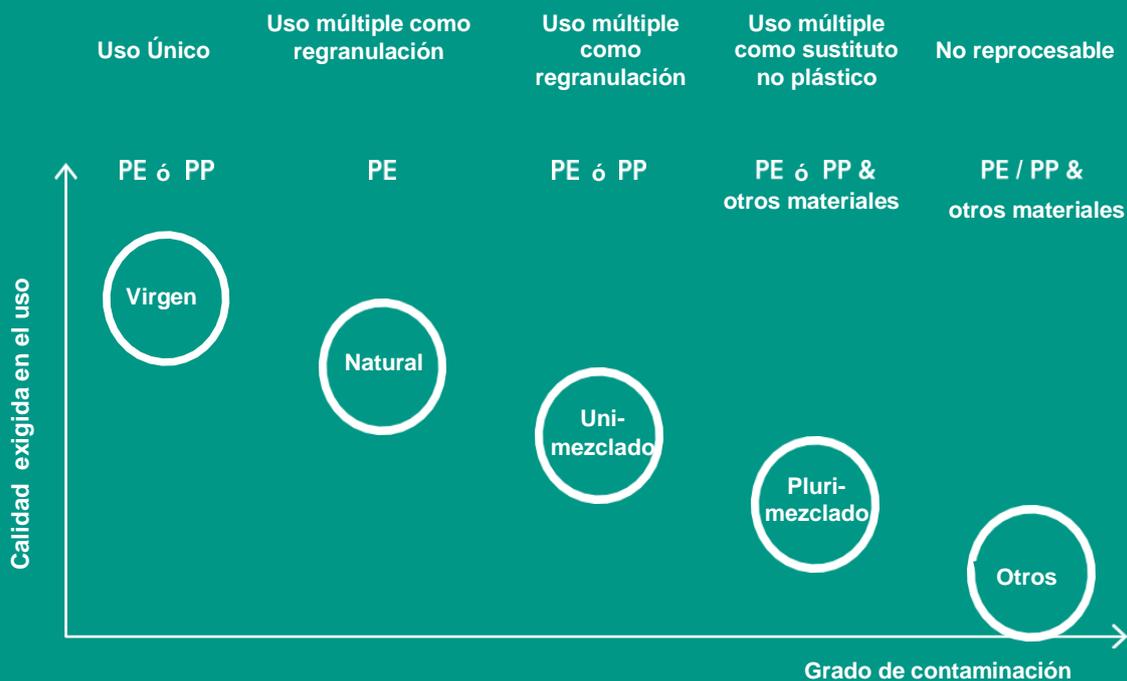
Fig. 16

## Mercado Europe (EU27+NO+CH) para el polietileno y el polipropileno (en millones de t y porcentaje) para el 2013



Fuente: Plásticos Europa, 2015.<sup>52</sup>

# Reutilización de PE y PP



Fuente: Sirkin yHouten, 1994.<sup>49</sup>



# Hierro y acero

El hierro es el metal más barato y más utilizado en la actualidad. Se descubrió por primera vez en la forma natural, que se presenta sólo en raras ocasiones, como hierro telúrico de origen volcánico, y principalmente como hierro meteórico. Los ejemplos más antiguos conocidos de hierro meteórico trabajado son cuentas de Gerzeh con fecha 3500 A.C.<sup>72</sup>. No se sabe cuándo ni cómo se produjo el hierro por primera vez a partir de minerales, se estima que se fundió por primera vez en el este de Asia Menor y el norte de Mesopotamia alrededor de 2000 - 1500 A.C.<sup>72</sup>

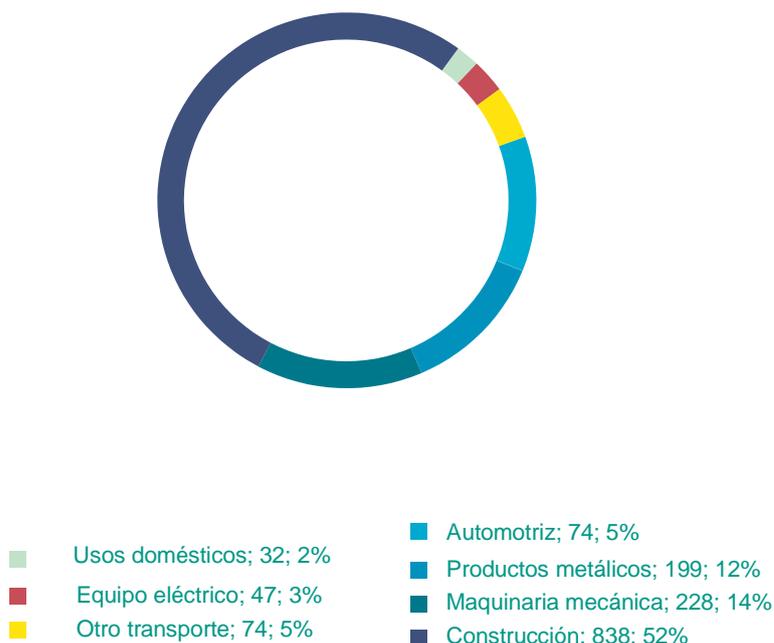
Acero es un término general para los materiales en los que el contenido de hierro es superior al de cualquier otro elemento, y en los que el contenido de carbono es normalmente inferior al 2% .<sup>73</sup> En 2013, la producción mundial de acero en bruto fue de 1,62 mil millones de toneladas. el metal más importante mucho más que el aluminio con 47,6 millones de t.<sup>51</sup> La mayor parte del acero se utiliza para construcciones como casas, aparcamientos, escuelas o rascacielos, sino también en cubiertas y como revestimiento de paredes exteriores.<sup>74</sup> La Figura 18 muestra las porciones del sector más importante. Es obvio que el acero se utiliza predominantemente para bienes de larga duración (por ejemplo, edificios) y de mediana duración (por ejemplo, vehículos), como se muestra en el Cuadro 11.

El reciclaje de acero es una práctica muy antigua y durante siglos se ha desarrollado un sistema de recolectores y procesadores de chatarra. En 2012, se informó que la fracción de chatarra para la producción de hierro y acero rondaba el 56% .<sup>76</sup> La Figura 19 muestra que la importancia de la basura es bastante diferente para las distintas regiones. El más alto es Turquía (90% de uso de chatarra) y el más bajo es China (11% de uso de chatarra).

Hay una gran cantidad de acero en stock y no disponible para reciclar (consulte la vida útil del producto que se muestra en la Tabla 11). En los países industrializados, la cantidad de hierro almacenado en las aplicaciones está entre 6 y 16 t / cápita.<sup>77</sup> Sin embargo, se ha informado que el nivel de saturación para el acero almacenado es de alrededor de 13 ± 2 t / cápita.<sup>77</sup> Tan pronto como alcanza el nivel de saturación, el uso de chatarra aumentará aún más. Se estima que en 2050 la proporción de chatarra podría alcanzar el 80% .<sup>75</sup>

Básicamente, el acero se produce a través de dos rutas principales, la ruta del horno de oxígeno básico (BF-BOF) y la ruta del horno de arco eléctrico (EAF). El BF-BOF se basa principalmente en el mineral como materia prima, sin embargo, la chatarra se utiliza como agente de enfriamiento para evitar temperaturas demasiado altas durante el soplado de oxígeno. La Tabla 12 compara las principales características de ambos procesos.

Fig. 18 | **Uso de acero (en millones de t y porcentaje) por sector en 2013**



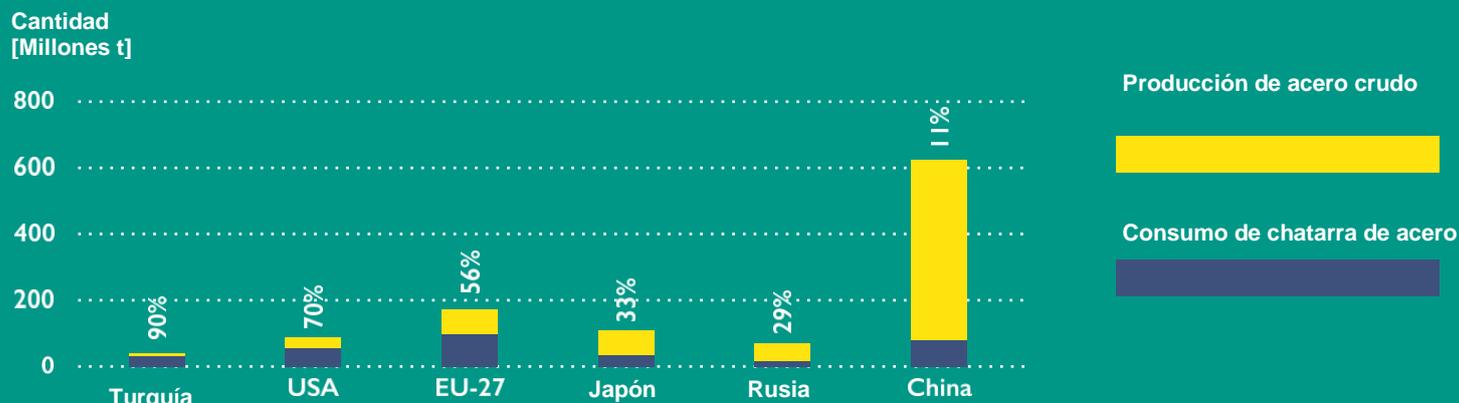
Fuente: Asociación Mundial del Acero, 2014.<sup>74</sup>

Tab.1 | **Vida útil normal del producto de acero**

PRODUCTO	VIDA UTIL NORMAL DEL PRODUCTO [AÑOS]
Construcción	20 – 60
Sector industrial	40
Maquinaria pesada	30
Rieles	25
Bienes de consumos duraderos	7 - 15
Vehículos	5 – 15
Latas de acero	< 1

Fuente: Bjoerkman y Samuelsson, 2014.<sup>75</sup>

# Producción de acero bruto y consumo de chatarra de los principales países



El porcentaje especifica la cantidad de chatarra en relación con la producción total de acero en cada país.

Fuente: Oficina de Reciclaje Internacional, 2013.<sup>76</sup>

Tab. 12 | Características básicas del horno básico de oxígeno (BF-BOF) y del horno de arco eléctrico (EAF)

	BF-BOF	EAF
<b>Materias primas</b>	Predominantemente mineral de hierro, carbón y chatarra de acero	Chatarra de acero y electricidad
<b>Porcentaje de la producción total de acero</b>	70 %	29 %
<b>Porcentaje de chatarra</b>	15 %	100 %
<b>Emisiones</b>	2.1 – 2.5 CO <sub>2</sub> /t	0.4 - 0.7 CO <sub>2</sub> /t
<b>Consumo de energía</b>	21 - 25 GJ/t	8 – 11 GJ/t
<b>Consumo de material virgen</b>	2.8 – 3.0 t/t	0.2 - 0.3 t/t

Fuente: Bjoerkman y Samuelsson, 2014.<sup>75</sup> y Laplace Conseil, 2013.<sup>78</sup>



Los datos demuestran de manera impresionante que el reciclaje de acero es algo bueno. Ayuda a ahorrar energía y recursos y reduce significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero. Incluso se puede concluir que la producción a través de la ruta EAF consume menos energía (y menos insensibilidad al CO<sub>2</sub>), sin embargo, se destaca que debido a los diferentes productos y calidades los procesos no son totalmente intercambiables.

En cascada de acero es solo una construcción auxiliar. Por un lado, el hierro como metal no mostrará degradación como se observa en la celulosa del polietileno. El acero producido a partir de recursos secundarios puede exhibir las mismas propiedades que el acero producido a partir de minerales vírgenes. Sin embargo, se ha demostrado anteriormente que una tasa de recuperación del 100% es imposible ya que una cierta porción se perderá debido a la disipación y la recolección incompleta. Por otro lado, el último paso de la cascada, la incineración, no es una solución viable para el acero. La principal limitación en el reciclaje de acero son los elementos tramp que pueden concentrarse en el hierro y disminuir las propiedades.

La conexión en cascada en el campo del hierro y el acero significa, por lo tanto, que los recursos (secundarios) que contienen altas cantidades de elementos de impurezas solo pueden utilizarse para acero de menor calidad. La Tabla 13 compara el nivel típico de impurezas de algunas materias primas (secundarias) con las especificaciones de algunos grados de acero. Es obvio que la chatarra que presenta un alto contenido de impurezas solo es factible de baja calidad. Se informa que la chatarra de acero de RAEE normalmente contiene cobre en una concentración del 2,3%. Sin embargo, se pueden mezclar diferentes tipos de chatarra o chatarra y mineral virgen para lograr las especificaciones requeridas.

Como mezcla de diferentes calidades de materias primas permite obtener un ciclo prácticamente cerrado sin una merma de calidad. Sin embargo, hay que señalar que todos los elementos tramp se alimentan de forma irreversible al ciclo de hierro. A medida que las tasas globales de reciclaje sigan aumentando (hasta un 80% 75), el problema de los elementos tramp se volverá más importante en el futuro. Por tanto, la minimización del arrastre perjudicial de elementos atrapados es de gran importancia. Las acciones que se resumen en la Tabla 14 parecen factibles para reducir el problema.<sup>75</sup>

El reciclaje de acero es una política muy atractiva para reducir el consumo de energía y recursos. La cascada en este contexto significa considerar contaminantes posibles pero no removibles en el ciclo del hierro, lo que comúnmente significa que se debe aceptar una calidad de producto más baja. Sin embargo, como no hay peligro de destruir los aglutinantes químicos, el principal límite del reciclaje son las pérdidas inevitables.

Tab. 13

## Contenido típico de elementos de impurezas (Cu, Sn, Ni, Cr, Mo) en diferentes tipos de materias primas y requisitos para la producción de diferentes calidades de acero

MATERIAS PRIMAS	TOTAL DE IMPUREZAS* CONTENIDAS [% MASA]	NIVEL DE CALIDAD	MAXIMO DE IMPUREZAS* CONTENIDAS [% MASA]
Hierro directamente reducido	0.02	Hojalata para envases y latas	0.12
Hierro en bruto	0.06	Hoja de calidad para envases	0.14
No. 1 producto de fábrica	0.13	Envasados de calidad y esmaltados de acero	0.16
Residuos	0.13	Hoja de calidad comercial	0.22
No. 1 Fundición intensa	0.20	Calidad para productos finos	0.25
Chatarra de auto compactada	0.51	Calidad especial en barras	0.35
No. 2 Fundición intensa	0.73	Calidad comercial en barras	0.50

Fuente: Bjoerkman y Samuelsson, 2014.<sup>75</sup>

Tab. 14

## Posibles acciones para reducir al mínimo la recogida de elementos de trampas para el hierro

ACCIÓN	DESCRIPCIÓN
Diseño para el reciclaje	Elección adecuada de los materiales a juntar. Fácil separación de los elementos importantes. Amplio espacio abierto a nuevas mejoras.
Mejor clasificación en la plantas de chatarras	Las desarmaduras han estado en el centro de atención desde la década de los 80' y los 90' y aun estas tecnologías no han sido desarrolladas. El separador magnético puede aumentar la producción con baja contaminación. Clasificación de los sensores. Mejor conocimiento de la composición de la chatarra
Mejorar el proceso en la planta de acero	Mantener la chatarra con un alto contenido de cobre en un ciclo separado. Procesos que permiten mayor tolerancia a las impurezas (por ejemplo, fundición directa)
Convivir con las impurezas	Desarrollo de nuevas aleaciones que permitan altos niveles de impurezas. Precipitando sulfuros de cobre a nanoescala.
Reducción	Mezclar la chatarra con unidades a base de mineral de hierro . Hierro reducido directamente. (HRD) Hierro briqueteado en caliente (HBC)
Comprensión sobre el flujo del acero.	Mejorar la comprensión en la sociedad sobre el flujo del acero. Modelos de acumulación de las impurezas Análisis de flujo de materiales. (AFM) Análisis de flujo de sustancias. (AFS)

# Discusión, análisis y conclusiones

## Eficiencia

Debido a las pérdidas inevitables (disipación) y la mezcla de materiales (intencionada o no), en la práctica es imposible una tasa de reciclaje del 100%. Además, todos los procedimientos de reciclaje requieren energía. Comúnmente, los programas de reciclaje son bastante intrincados y muestran grandes desviaciones en términos de entrada de materiales (por ejemplo, concentraciones, contaminaciones), materiales de salida (por ejemplo, pureza) y detalles del proceso (por ejemplo, consumo de energía, emisiones). Se necesitaría con urgencia un criterio comparable a la incineración (es decir, la fórmula R1 de acuerdo con la DMA), ya que esto lleva al sector hacia una mayor eficiencia. Velis y Brunner<sup>90</sup> concluyen que, hasta el momento, no se dispone de una medida adecuada.

## Calidad

Debe aceptarse una caída más o menos pronunciada de la calidad durante la utilización, así como durante el procesamiento de materiales o productos. Para algunos programas de reciclaje, la caída de la calidad es insignificante (por ejemplo, reciclaje de metales), pero para otros la caída de la calidad es muy alta (por ejemplo, el reciclaje de mezclas de plásticos). Con frecuencia, en el caso de una clara pérdida de calidad, el proceso de reciclaje se considera como "ciclo descendente". Sin embargo, la caída de la calidad puede cuantificarse con fuerza. Una vez más, no existe un criterio o fórmula simple para comparar los procesos de reciclaje entre sí ni con otras opciones (por ejemplo, incineración). Velis y Brunner han señalado la necesidad de calidad<sup>90</sup>.

## Medir la calidad y En cascada la eficiencia

Existe una serie de procedimientos para evaluar el impacto ambiental de productos o servicios. Por tanto, es razonable aplicar estos indicadores para diferentes opciones en la gestión de residuos. El ACV es una de las metodologías cuantitativas más comunes para evaluar la sostenibilidad de las actividades humanas. Está exactamente definido en una serie de estándares internacionales que garantizan que diferentes estudios obtendrán resultados comparables. Sin embargo, es posible que existan diferentes condiciones de entrada (por ejemplo, mezcla de electricidad local) o que se definan diferentes límites del sistema. Por tanto, el resultado de una LCA no es un número único, sino un conjunto de impactos que deben ponderarse y pueden interpretarse de forma más o menos aleatoria.

## ¿Puede el reciclaje cerrar el círculo?

La legislación europea promueve actualmente la llamada economía circular. Se basa en altas tasas de reciclaje (por ejemplo, 90 para el metal) con el fin de disminuir la demanda (e importación) de materias primas. Incluso el reciclaje es una política excelente para ahorrar recursos y energía, hay que considerar si sus limitaciones. Cada ciclo tiene fugas. Dado que el esquema de reciclaje difiere mucho en términos de calidad y eficiencia (ver arriba), se requiere la evaluación de las cadenas de productos completas (incluidas las cascadas). Sin embargo, una evaluación de las cadenas en cascada es una tarea complicada, pero ofrece resultados mucho mejores que una determinación pura de las tasas de reciclaje.

La conexión en cascada tiene en cuenta la pérdida inherente de calidad a lo largo del tiempo. Tuvo su origen en el campo de la utilización de biomasa. Sin embargo, parece posible extender el concepto a otros materiales. Básicamente, un recurso se usa secuencialmente a lo largo del tiempo con una calidad decreciente. La incineración debe realizarse como último paso solo si el uso del material es completamente imposible.

El concepto se usa ampliamente para materiales de base biológica como la madera. A medida que la generación de celulosa recoge CO<sub>2</sub> de la atmósfera, la cascada representa un ciclo. En el último paso, la biomasa se puede utilizar como fertilizante o combustible. En ambos casos, el carbono se retroalimenta.

Dado que los plásticos se basan en fuentes de carbono fósil (petróleo), una cascada de plásticos no puede ser un circuito cerrado. Hoy en día, la cascada de plásticos no está muy desarrollada y es obvio que hay un gran margen para nuevas mejoras. El hierro como metal puede sufrir una utilización en cascada con algunas restricciones. El material no se degradará por sí solo sino debido a la contaminación. Como varios contaminantes disminuirán las propiedades, el material se puede utilizar dentro de la cascada con una calidad inferior. Sin embargo, la cascada no termina con la incineración. Puede ser, teóricamente, infinito pero en la práctica las pérdidas inevitables requieren un aporte adicional de materiales vírgenes.

# Referencias Bibliográficas

## Lectura general

### Eficiencia de recursos

Beasley, J. y Georgeson, R. (2014) AVANZANDO LA EFICIENCIA DE LOS RECURSOS EN EUROPA - Indicadores y escenarios de políticas de residuos para ofrecer una Europa sostenible y eficiente en el uso de recursos, European Environmental Bureau (EEB), Bruselas / BE, <http://www.eeb.org/EEB/?LinkSer-VID=4E9BB68D-5056-B741-DBCCE-36ABD15F02F> (6 de agosto de 2015).

Warhurst, M. y Slater, B. (2010) Midiendo nuestro uso de recursos: una herramienta vital para crear una UE eficiente en el uso de recursos, Amigos de la Tierra Inglaterra, Gales e Irlanda del Norte, Londres / Reino Unido, [https://www.foeeurope.org/sites/default/files/publications/Measuring\\_resource\\_use.pdf](https://www.foeeurope.org/sites/default/files/publications/Measuring_resource_use.pdf) (6 de agosto de 2015).

Giljum, S., Hinterberger, F., Lutter, S. y Polzin, C. (2009) Cómo medir el uso de recursos de Europa, Sustainable Europe Research Institute (SERI), Viena / AT, [https://www.foeeurope.org/sites/default/archivos/publicaciones/FoEE\\_SERI\\_measuring\\_europes\\_resource\\_use\\_0609.pdf](https://www.foeeurope.org/sites/default/archivos/publicaciones/FoEE_SERI_measuring_europes_resource_use_0609.pdf) (6 de agosto de 2015).

### Polietileno / polipropileno

Vasile, C. y Pascu, M. (2005) Guía práctica del polietileno, Tecnología RAPRA, Shrewsbury / Reino Unido.

Jeremic, D. (2014) Polietileno. Enciclopedia de química industrial de Ullmann, Wiley-VCH Verlag.

Gahleitner, M. y Paulik, C. (2014) Polipropileno. Enciclopedia de química industrial de Ullmann. Wiley-VCH Verlag.

### En cascada

Sirkin, T. y Houten, M. t. (1994) La cadena en cascada: una teoría y una herramienta para lograr la sostenibilidad de los recursos con aplicaciones para el diseño de productos. Recursos, conservación y reciclaje, 10, 213-276.

### Reciclaje

Worrell E., Reuter M., Manual de reciclaje: estado del arte para profesionales, analistas y científicos, Elsevier, 2014.

### LCA

Klöpffer W., Grahl B., Ökobilanz (LCA): Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf, John Wiley & Sons, 2012.

Kaufman S., Evaluación del ciclo de vida (LCA) y su aplicación a la gestión sostenible de residuos, en Tecnología de conversión de residuos a energía, Klinghoffer NB, Castaldi MJ, Woodhead Publishing, 29-41, 2013.

## Literatura Citada

<sup>1</sup> Comisión Europea (2014), Informe sobre materias primas críticas para la UE, [http://ec.europa.eu/enterprise/politicas/materias-primas/archivos/docs/informe-crm-sobre-materias-primas-criticas\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/enterprise/politicas/materias-primas/archivos/docs/informe-crm-sobre-materias-primas-criticas_en.pdf) (6 de agosto de 2015).

<sup>2</sup> Departamento de Energía de EE. UU. (2011), Estrategia de materiales críticos, [http://energia.gov/sites/prod/files/DOE\\_CMS2011\\_FINAL\\_Full.pdf](http://energia.gov/sites/prod/files/DOE_CMS2011_FINAL_Full.pdf) (6 de agosto de 2015).

<sup>3</sup> Graedel TE; Cao J. (2010) Espectros metálicos como indicadores de desarrollo. Actas de la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos de América PNAS, 107, 20905-20910.

<sup>4</sup> Directiva 2008/98 / CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre residuos y por la que se derogan determinadas Directivas. El Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión Europea, Bruselas / BE.

<sup>5</sup> Kral, U., Kellner, K. y Brunner, PH (2013) El uso sostenible de los recursos requiere "ciclos limpios" y "sumideros finales" seguros. Science of The Total Environment, 461-462, 819-822.

<sup>6</sup> Ayres, RU, Ayres, LW y Martinás, K. (1998) Exergía, contabilidad de residuos y análisis del ciclo de vida. Energy, 23, 355-363.

<sup>7</sup> Das, SK (2006) Reducción de la pérdida por fusión oxidativa del aluminio y sus aleaciones, Laboratorio Nacional Argonne, IL (EE. UU.), [http://www.phinix.net/services/Energy\\_Management/Reduction\\_of\\_Oxidative\\_Melt.pdf](http://www.phinix.net/services/Energy_Management/Reduction_of_Oxidative_Melt.pdf) (6 de agosto de 2015).

<sup>8</sup> Uchida, H. y Ohga, S. (2000) Reciclaje de productos de aluminio. Revista de ciencia avanzada, 12, 185-188.

- <sup>9</sup> Reck, B. y Graedel, T. (2012) Desafíos en el reciclaje de metales. *Science*, 337, 690-695.
- <sup>10</sup> Savov, L., Volkova, E. y Janke, D. (2003) Reciclaje de chatarra de cobre y estaño en acero. *RMZ - Materiales y geoambiente*, 50, 627-640.
- <sup>11</sup> Nakamura, S., Kondo, YMK, Nakajima, K., Tasaki, T. y Nagasaka, T. (2012) Pérdidas de calidad y dilución en el reciclaje de materiales ferrosos de automóviles de pasajeros al final de su vida útil: análisis de entrada y salida bajo consideración explícita de calidad de chatarra. *Tecnología de ciencias ambientales*, 46, 9266-9273.
- <sup>12</sup> Badía, J., Vilaplana, F., Karlsson, S. y Ribes-Greus, A. (2009) El análisis térmico como herramienta de calidad para evaluar la influencia de la degradación termomecánica en el poli (tereftalato de etileno) reciclado. *Ensayos de polímeros*, 28, 169-175.
- <sup>13</sup> Dahmus, JB y Gutowski, TG (2007) Lo que se recicla: un modelo basado en la teoría de la información para el reciclaje de productos. *Ciencia y tecnología ambientales*, 41, 7543-7550.
- <sup>14</sup> Directiva 2000/53 / CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 18 de septiembre de 2000, sobre vehículos para desguace. El Parlamento Europeo y el Consejo de la Comunidad Europea, Bruselas / BE.
- <sup>15</sup> Goorhuis, M. y Bartl, A. (2011) Documento temático clave de ISWA sobre prevención de desechos, minimización de desechos y gestión de recursos, Grupo de trabajo de ISWA sobre reciclaje y minimización de desechos, Viena / AT, [http://www.iswa.org/index.php?eID=tx\\_bee4memberships\\_download & fileU-id = 117](http://www.iswa.org/index.php?eID=tx_bee4memberships_download&fileU-id=117) ((6 de agosto de 2015).
- <sup>16</sup> Bartl, A. (2014) Pasar del reciclaje a la prevención de residuos: una revisión de barreras y habilitaciones. *Gestión e investigación de residuos*, 32, 3-18.
- <sup>17</sup> Kral, U. y Brunner, P. (2013) Los sumideros finales como elementos clave para la construcción de una sociedad de reciclaje sostenible, ISWA Beacon Conference "The 2nd International Conference on Final Sinks - Sinks a Vital Element of Modern Waste Management", 16 - 18 de mayo de 2013, Espoo / FI.
- <sup>18</sup> Brunner, PH (2010) Ciclos limpios y sumideros finales seguros. *Gestión e investigación de residuos*, 28, 575-576.
- <sup>19</sup> Mahfoud, M. y Emadi, D. (2010) Reciclaje de aluminio: desafíos y oportunidades. *Investigación avanzada de materiales*, 83-86, 571-578.
- <sup>20</sup> Martens, H. (2011) *Recyclingtechnik*, Springer, Heidelberg / DE.
- <sup>21</sup> Das, SK, verde, JAS, Kaufman, JG, Emadi, D. y Mahfoud, M. (2010) Reciclaje de aluminio: un enfoque integrado para toda la industria. *JOM*, 62, 23-26.
- <sup>22</sup> Kermeli, K., Weer, P., Crijns-Graus, W. y Worrell, E. (2014) Mejora de la eficiencia energética y reducción de GEI en la producción mundial de aluminio primario. *Eficiencia energética*, 7, 987-1011.
- <sup>23</sup> Tsesmelis, K. (2013) Reciclaje: una parte importante de la historia del aluminio, Congreso de la OEA, Duesseldorf / DE, 25-26 de febrero, [http://www.world-aluminium.org/media/filer\\_public/2013/02/27/aluminum\\_recycling\\_-\\_an\\_important\\_part\\_of\\_the\\_aluminium\\_story.pdf](http://www.world-aluminium.org/media/filer_public/2013/02/27/aluminum_recycling_-_an_important_part_of_the_aluminium_story.pdf) (6 de agosto).
- <sup>24</sup> WRAP (2015) Información de mercado, vidrio: <http://www.wrap.org.uk/content/vidrio-4>, plásticos: <http://www.wrap.org.uk/contenido/plastico>, papel: <http://www.wrap.org.uk/content/paper-2>, metales: <http://www.wrap.org.uk/content/metal-0> (6 Agosto de 2015).
- <sup>25</sup> PNUMA (2011) Tasas de reciclaje de metales: un informe de estado, un informe del grupo de trabajo sobre el metal mundial Flujos al Panel Internacional de Recursos. Graedel, TE, Allwood, J., Birat, J.-P., Reck, BK, Sibley, SF, Sonnemann, G., Buchert, M., Hagelüken, C. [http://www.unep.org/resourcepanel/Portals/24102/PDFs/Metals\\_Recycling\\_Rates\\_110412-1.pdf](http://www.unep.org/resourcepanel/Portals/24102/PDFs/Metals_Recycling_Rates_110412-1.pdf) (6 de agosto de 2015).
- <sup>26</sup> Gutowski, TG, Sahni, S., Allwood, JM, Ashby, MF y Worrell, E. (2013) La energía necesaria para producir materiales: limitaciones en las mejoras de intensidad energética, parámetros de demanda. *Transacciones filosóficas: ciencias matemáticas, físicas y de la ingeniería*, 371, 1-14.
- <sup>27</sup> Haber, F. (1927) Das Gold im Meerwasser. *Angewandte Chemie*, 40, 303-314.
- <sup>28</sup> Cohen, BL (1983) Reactores reproductores: una fuente de energía renovable. *American Journal of Physics*, 51, 75-76.
- <sup>29</sup> Haraguchi, H. (2004) Metalómica como ciencia biometal integrada. *Revista de espectrometría atómica analítica*, 19, 5-14.
- <sup>30</sup> Johnson, J., Harper, EM, Lifset, R. y Graedel, TE (2007) Cenando en el Tabla periódica: ¿Concentraciones de metales en relación con el reciclaje. *Ciencia y tecnología ambientales*, 41, 1759-1765.
- <sup>31</sup> Arena, U. (2015) De residuos a energía a residuos a recursos: El nuevo papel de los tratamientos térmicos de residuos sólidos en la Sociedad de Reciclaje. *Gestión de residuos*, 37, 1-2.
- <sup>32</sup> Huysman, S., Sala, S., Mancini, L., Ardente, F., Alvarenga, RA, De Meester, S., Mathieux, F. y Dewulf, J. (2015) Hacia un marco sistematizado de recursos indicadores de eficiencia. *Recursos, conservación y reciclaje*, 95, 68-76.
- <sup>33</sup> Allwood, JM, Ashby, MF, Gutowski, TG y Worrell, E. (2011) Eficiencia de materiales: un libro blanco. *Recursos, conservación y reciclaje*, 55, 362-381.
- <sup>34</sup> Warhurst, M. y Slater, B. (2010) Midiendo el uso de nuestros recursos: una herramienta vital para crear una UE eficiente en el uso de los recursos, Amigos de la Tierra Inglaterra, Gales e Irlanda del Norte, Londres / Reino Unido, [https://www.foeeurope.org/sites/default/files/publications/Measuring\\_resource\\_use.pdf](https://www.foeeurope.org/sites/default/files/publications/Measuring_resource_use.pdf) (6 de agosto de 2015).
- <sup>35</sup> Giljum, S., Hinterberger, F., Lutter, S. y Polzin, C. (2009) Cómo medir el uso de recursos en Europa, Sustainable Europe Research Institute (SERI), Viena / AT, [https://www.foeeurope.org/sites/default/files/publications/FoEE\\_SERI\\_measuring\\_europes\\_resource\\_use\\_0609.pdf](https://www.foeeurope.org/sites/default/files/publications/FoEE_SERI_measuring_europes_resource_use_0609.pdf) (6 de agosto de 2015).
- <sup>36</sup> Beasley, J. y Georgeson, R. (2014) AVANZANDO EL EFICIENCIA DE LOS RECURSOS CY EN EUROPA - Indicadores y escenarios de políticas de residuos para ofrecer una Europa sostenible y eficiente en el uso de los recursos, Europa: una Oficina de Medio Ambiente (EEB), Bruselas / BE, <http://www.eeb.org/EEB/?LinkSer-vid=4E9BB68D-5056-B741-DBCCE-36ABD15F02F> (6 de agosto de 2015).
- <sup>37</sup> Lang-Koetz, C., Pastewski, N. y Rohn, H. (2010) Identificación de nuevas tecnologías, productos y estrategias para la eficiencia de los recursos. *Ingeniería y tecnología químicas*, 33, 559-566.
- <sup>38</sup> Fachbereich Strategische Energie- und Umweltfragen (2012) Demanda acumulada de energía (KEA) Términos, definiciones, métodos de cálculo, VDI 4600, VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt.

- <sup>39</sup> Ritthoff, M., Rohn, H. y Liedtke, C. (2002) MIPS berechnen - Ressourcenproduktivität von Produkten und Dienstleistungen, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, Wuppertal / DE, <http://epub.wupperinst.org/files/1533/WS27.pdf> (6 de agosto de 2015).
- <sup>40</sup> Ayres, RU, Ayres, LW y Martinás, K. (1998) Ejercicio, contabilidad de residuos y análisis del ciclo de vida. *Energy*, 23, 355-363.
- <sup>41</sup> Rechberger, H. y Brunner, PH (2002) Un nuevo método basado en la entropía para respaldar las decisiones de gestión de recursos y residuos. *Ciencia y tecnología ambientales*, 36, 809-816.
- <sup>42</sup> Narodoslowsky, M. y Krotscheck, C. (1995) El índice de procesos sostenibles (SPI): evaluación de procesos de acuerdo con la compatibilidad ambiental. *Revista de materiales peligrosos*, 41, 383-397.
- <sup>43</sup> Krotscheck C., Narodoslowsky M. (1996) El índice de proceso sostenible Una nueva dimensión en la evaluación ecológica. *Ingeniería ecológica*, 6, 241-258.
- <sup>44</sup> Vitousek, P., Ehrlich, P., Ehrlich, A. y Matson, P. (1986) Apropiación humana de los productos de la fotosíntesis. *Biociencia*, 36, 368-373.
- <sup>45</sup> Rees, WE (1992) Huellas ecológicas y capacidad de carga apropiada: lo que omite la economía urbana. *Medio Ambiente y Urbanización*, 4, 131-140.
- <sup>46</sup> Wackernagel, M. y E. Rees, W. (1997) Barreras estructurales y de percepción para invertir en capital natural: Economía desde una perspectiva de huella ecológica. *Economía ecológica*, 20, 3-24.
- <sup>47</sup> Christensen, T., Gentil, E., Boldrin, A., Larsen, A., Weidema, B. y Hauschild, METRO. (2009) Balance C, emisiones de dióxido de carbono y potenciales de calentamiento global en modelos de LCA de sistemas de gestión de residuos. *Waste Management & Research*, 27, 707-715.
- <sup>48</sup> Arnold, K., Bienge, K., von Geibler, J., Ritthoff, M., Targiel, T., Zeiss, C., Meinel, U., Kristof, K. y Bringezu, S. (2009) Klimaschutz und optimierter Ausbau erneuerbarer Energien durch Kaskadennutzung von Biomasseprodukten, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, Wuppertal / DE, <http://epub.wupperinst.org/files/4448/WR5.pdf> (6 de agosto de 2015).
- <sup>49</sup> Sirkin, T. y Houten, M. t. (1994) La cadena en cascada: una teoría y una herramienta para lograr la sostenibilidad de los recursos con aplicaciones para el diseño de productos. *Recursos, conservación y reciclaje*, 10, 213-276.
- <sup>50</sup> Janicki, S., Groleau, R. y Bain, M. (1992) The Material Cascade: An Alternative Form of Remind Utilization, Antec'92, *Plastics: Shaping the Future*, Detroit / EE. UU., 3-7 de mayo de 1992, 1201-1204.
- <sup>51</sup> Bray, LE: (2015) Aluminio, US Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, enero de 2015, Departamento del Interior de EE. UU. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/aluminium/mcs-2015-alumi.pdf> (6 de agosto de 2015).
- <sup>52</sup> Plastics Europe (2015) Plásticos: los hechos 2014/2015 Un análisis de los datos de producción, demanda y residuos de plásticos europeos. <http://www.plasticseurope.org/cust/documentrequest.aspx?DocID=62506> (6 Agosto de 2015).
- <sup>53</sup> Fenton, MD: (2015) HIERRO Y STEEL, Servicio Geológico de EE. UU., Resúmenes de productos minerales, enero de 2015, Departamento del Interior de EE. UU., [Http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/iron\\_&\\_steel/mcs-2015-feste.pdf](http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/iron_&_steel/mcs-2015-feste.pdf) (6 de agosto de 2015).
- <sup>54</sup> Administración de Información Energética de los Estados Unidos (EIA) (2014) Estadísticas energéticas internacionales, suministro total de petróleo 2013: <http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/iedind/ex3.cfm?tid=5&pid=53&aid=1&cid=ww,&syid=2010&eyid=2014&unit=TBDP> (10 de abril 2015).
- <sup>55</sup> Field, CB, Behrenfeld, MJ, Randersson, JT y Falkowski, P. (1998) Producción primaria de la biosfera: integración de componentes terrestres y oceánicos. *Science*, 281, 237-240.
- <sup>56</sup> Miyamoto, K. (1997) Sistemas biológicos renovables para la producción alternativa de energía sostenible. *Boletín de Servicios Agrícolas de la FAO - 128*, FAO - Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Osaka / JP.
- <sup>57</sup> Agencia Internacional de Energía (2010) *World Energy Outlook 2010 Edition*, IEA, Paris / FR, <http://www.worldenergyoutlook.org/media/weo2010.pdf> (6 de agosto de 2015).
- <sup>58</sup> Fraanje, PJ (1997) Cascada de madera de pino. *Recursos, conservación y reciclaje*, 19, 21-28.
- <sup>59</sup> Hoeglmeier, K., Steubing, B., Weber-Blaschke, G. y Richter K., (2015) Optimización de la utilización de la madera basada en el LCA, teniendo en cuenta especialmente el uso en cascada de la madera. *Revista de Gestión Ambiental*, 152, 158-170.
- <sup>60</sup> Perrin, M., Paton, J. y Williams, E. (1937) Mejoras en o relacionadas con hilos artificiales y su producción, patente británica GB472051.
- <sup>61</sup> Ziegler, K., Breil, H., Holzkamp, E. y Martin, H. (1953) Un proceso para preparar polietilenos de alto peso molecular. Patente alemana DE973626.
- <sup>62</sup> Jeremic, D. (2014) Polietileno. *Enciclopedia de química industrial de Ullmann*, Wiley-VCH Verlag.
- <sup>63</sup> Natta, G. (1955) Polimeri ad alto peso moleculare del propilene e procedimento per la loro preparazione, Patente italiana IT535712.
- <sup>64</sup> Natta, G. (1955) Produzione di altri polimeri lineari a struttura regolare da alfaolefine, patente italiana IT 537425.
- <sup>65</sup> Ziegler, K., Breil, H., Martin, H. y Holzkamp, E. (1978) Polimerización de hidrocarburos etilénicamente insaturados, patente estadounidense US4125698.
- <sup>66</sup> HUG Industrietechnik und Arbeitssicherheit (2015) *Kunststoff Tabelle Eigen-schaften und technischen Werte*, <http://www.hug-technik.com/inhalt/ta/kunstst-off.html> (10 de abril de 2015)
- <sup>67</sup> Shen, L., Worrel, E. y Patel, M. (2009) Desarrollo presente y futuro en plásticos a partir de biomasa. *Biocombustibles, bioproductos y biorrefino*, 4, 25-40.
- <sup>68</sup> Valenza, A. y Mantia FP, (1988) Reciclaje de desechos de polímeros: Parte II - Polipropileno degradado por tensión. *Degradación y estabilidad de polímeros*, 20, 63-73.
- <sup>69</sup> Nasir, A., Yasin, T. e Islam, A. (2011) Comportamiento de degradación termo-oxidativa del polipropileno reciclado. *Revista de ciencia aplicada de polímeros*, 119, 3315-3320.
- <sup>70</sup> Shen, L. y Worrell, E. (2014) Reciclaje de plástico. En: *Worrell, E. y Reuter, M. A. (eds.): Manual de reciclaje*, Elsevier, págs. 179-190.

71 Shen, L., Nieuwlaar, E., Worrell, E. y Patel, MK (2011) Energía del ciclo de vida y emisiones de GEI del reciclaje de PET: efectos orientados al cambio. The International Journal of Life Cycle Assessment, 16, 522-536.

72 Schauwinhold, D. y Toncourt, M. (2012) Steel, 1. Introducción e historia, Enciclopedia de química industrial de Ullmann, Wiley-VCH Verlag.

73 Schauwinhold, D., Kalla, U., Kalwa, G. (2012) Steel, 6. Usos, Enciclopedia de Química Industrial de Ullmann, Wiley-VCH Verlag.

<sup>74</sup>World Steel Association (2014) Uso de acero por sector en 2014: <http://www.world-steel.org/steel-by-topic/construction.html> (10 de abril de 2015).

<sup>75</sup>Bjoerkman, B. y Samuelsson, C. (2014) Reciclaje de acero. En: Worrell, E. y Reuter, MA (eds.): Manual de reciclaje, Elsevier, págs. 65-83.

<sup>76</sup>Bureau of International Recycling - Ferrous Division (2013) World Steel Recycling in Figures 2008 - 2012: <http://www.bir.org/assets/Documents/publicaciones/folletos/7587FerrousReport2013.pdf> (6 de agosto de 2015).

<sup>77</sup>Pauliuk, S., Wang, T. y Müller, DB (2013) Acero en todo el mundo: Estimación de existencias de hierro en uso para 200 países. Recursos, conservación y reciclaje, 71, 22-30.

<sup>78</sup>Laplace Conseil (2013) Evaluación de las implicaciones del Plan de acción del acero de la UE en la producción y el comercio de chatarra de acero. Convención Mundial de Reciclaje, Varsovia / PL, 28 de octubre de 2013 <http://www.laplaceconseil.com/LaplaceConseil/htdocs/admin/upload/File/BIR%20World%20Re-cycling%20Convention%20Warsaw.pdf> (6 Agosto de 2015).

<sup>79</sup>Rem, P., Broeck, vd F. y Bakker, M. (2012) Purificación de chatarra de acero post-consumo. Fabricación de hierro y acero, 39, 504-507.

<sup>80</sup>Velis, CA y Brunner, PH (2013) Reciclaje y eficiencia de recursos: es hora de pasar de la cantidad a la calidad. Gestión e investigación de residuos, 33, 539-540.

## Agradecimientos

**Grupo de Referencia y Colaboradores:** Deseamos expresar nuestra gratitud al equipo de trabajo sobre Gestión de Recursos, al que se consultó continuamente y que proporcionó aportes y orientación en el tema. Los miembros del Grupo fueron: Elisa Tonda (PNUMA DTIE), Heijo Scharf (Avfalzorg), Jean-Paul Leglise (ISWA), John Skinner (SWANA), Liaz-zat Rabbiosi (PNUMA DTIE), Patrick Dorvil (BEI), Peter Börkey (OCDE), Sarah Sanders Hewett (ERM), Tore Hulgaard (Rambøll). Además, quisiéramos agradecer a los miembros de la Junta de ISWA y a los miembros del Comité Científico y Técnico por sus contribuciones a los resultados del Grupo de Trabajo a través de sugerencias, comentarios escritos y en persona y participación en las sesiones y talleres organizados en septiembre-diciembre de 2014 en Sao Paulo (Congreso Mundial de ISWA 2014), y en junio de 2015 en Paris (Taller del Equipo de Trabajo sobre Gestión de Recursos). Por último, quisiéramos agradecer a los diversos expertos y consultados que aumentaron la calidad del informe con sus valiosas aportaciones.

**Diseño y diagramación:** Ana Loureiro y Deslink Design

**Fotografías y gráficos:** Las fotografías y los gráficos fueron proporcionados y desarrollados por Deslink Design utilizando los gráficos existentes con el permiso de los autores acreditados.



**Miembros del grupo de trabajo de  
ISWA , área gestión de recursos**

Björn Appelqvist  
Presidente  
Ciudad de Copenhagen,  
Dinamarca

Ana Loureiro EGF,  
Portugal

Andreas Bartl  
Universidad Tecnológica de Viena,  
Austria

Bettina Kamuk  
Rambøll, Dinamarca

Costas Velis  
Universidad de Leeds,  
Reino Unido

Gary Crawford Veolia,  
Francia

Jane Gilbert Carbón  
Clarity, Reino Unido

Martin Brocklehurst  
La Institución Colegiada de  
Gestión de Residuos,  
Reino Unido

Kata Tisza  
Secretaría General de ISWA

Elaborado por el  
Equipo de Gestión de  
Recursos de ISWA con  
el apoyo de:



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN  
Vienna | Austria



International Solid Waste Association  
Auerspergstrasse 15, Top 41 1080  
VIENNA — AUSTRIA  
Telephone +43 (1) 253 6001  
Fax +43 (1) 253 6001 99  
[www.iswa.org](http://www.iswa.org) [iswa@iswa.org](mailto:iswa@iswa.org)