

Evaluación del impacto ambiental de uniones roscadas en bronce mediante el análisis del ciclo de vida (ACV) de productos¹

Environmental Impact Assessment of Brass-Threaded Unions through Product Life Cycle Assessment (LCA)²

Avaliação do impacto ambiental de uniões roscadas em bronze mediante a análise do ciclo de vida (ACV) de produtos³

Carlos Eduardo Fúquene-Retamoso⁴

Jaime Andrés Lara-Borrero⁵

Sandra Méndez-Fajardo⁶

¹ Fecha de recepción: 18 de enero de 2010. Fecha de aceptación para publicación: 2 de agosto de 2010. Este artículo se deriva de un proyecto de investigación denominado *Aplicación del análisis del ciclo de vida de producto como apoyo a la toma de decisiones en la selección de materiales para la fabricación de elementos de unión roscados para tubería*, con número de registro 000425, financiado por la Pontificia Universidad Javeriana.

² Submitted on: January 18, 2010. Accepted on: August 2, 2010. This article results from the research project called, *Product Life Cycle Assessment: A Supporting Tool for making decisions when selecting Materials for Threaded Unions in Piping Systems*, funded by the Pontificia Universidad Javeriana with registration number 000425.

³ Data de recepção: 18 de janeiro de 2010. Data de aceitação para publicação: 2 de agosto de 2010. Este artigo deriva-se de um projeto de pesquisa denominado *Aplicação da análise do ciclo de vida de produto como apoio à tomada de decisões na seleção de materiais para a fabricação de elementos de união roscados para tubulação*, com número de registro 000425, financiado pela Pontificia Universidade Javeriana.

⁴ Ingeniero industrial, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. Master of Environmental Management, Portland State University, Estados Unidos. Profesor asociado, Departamento de Ingeniería Industrial, Pontificia Universidad Javeriana. Correo electrónico: cfuquene@javeriana.edu.co.

⁵ Ingeniero civil, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. Magíster en Ingeniería y Gestión Ambiental, Universidad Politécnica de Cataluña, España. Doctor en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, especialidad en Territorio y medio ambiente, Universidad Politécnica de Madrid, España. Profesor asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana. Correo electrónico: laraj@javeriana.edu.co.

⁶ Ingeniera civil, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. Magíster en Ingeniería Civil con énfasis Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Profesora asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana. Correo electrónico: sandra.mendez@javeriana.edu.co.

Resumen

En este artículo se evalúa el impacto ambiental de uniones roscadas para tubería fabricadas en bronce y se analizan dos escenarios de acuerdo con la cantidad de material reciclado utilizado en el proceso: (i) 100% materia prima virgen y (ii) 92,3% de material reciclado. Se utilizó el análisis de ciclo de vida (ACV) de productos, apoyado en el Ecoindicador 99, para determinar el grado de impacto, y en la herramienta informática Simapro®, para el desarrollo de los cálculos. En el escenario de productos con una formulación de 100% de materia prima virgen se estableció que los mayores efectos ambientales se alcanzaron en las categorías de impacto, correspondientes a la extracción de minerales y generación de material inorgánico respirable en suspensión. Para el escenario con 92,3% de material reciclado se estableció que los principales efectos negativos correspondieron a la emisión de respirables orgánicos y a la categoría de acidificación/eutroficación. Al comparar los dos escenarios se detectó una atenuación del impacto en las categorías de extracción de minerales y respirables inorgánicos. Como consecuencia del uso de material reciclado en este producto se redujeron notablemente los impactos globales del 231% en términos del indicador *Pt*.

Palabras clave

Evaluación del impacto ambiental, ACV, bronce, reciclaje.

Abstract

This paper establishes an environmental impact assessment applied to brass threaded unions. Two different scenarios were analyzed based on the amount of material used in the process: i) 100% virgin raw material usage and ii) 92.3% of recycled material usage. For the analysis and environmental impact evaluation, this study made use of the life cycle assessment methodology (LCA). It also used Ecoindicator 99 for grading impact, as well as the computer tool Simapro® for calculations. When a composition of 100% virgin raw material was used, significant impacts were identified on mineral extraction and air suspended inorganic material categories. For 92.3% of recycled material, major effects were related to air suspended organic material and impact category related to acidification/eutrophication. The comparison of both scenarios made it possible to detect an impact attenuation in mineral extraction and air suspended inorganic material categories. As a consequence of using recycled material in the product, a significant global impact reduction of 231% in terms of *Pt* was noticed.

Key words

Environmental impact assessment, LCA, brass, recycling.

Resumo

Neste artigo avalia-se o impacto ambiental de uniões roscadas para tubulação fabricada em bronze e analisam-se dois cenários de acordo com a quantidade de material reciclado utilizado no processo: (i) 100% matéria prima virgem e (ii) 92,3% de material reciclado. Utilizou-se a análise de ciclo de vida (ACV) de produtos, apoiado no Ecoindicador 99, para determinar o grau de impacto, e na ferramenta informática Simapro®, para o desenvolvimento dos cálculos. No cenário de produtos com uma formulação de 100% de matéria prima virgem estabeleceu-se que os maiores efeitos ambientais foram alcançados nas categorias de impacto, correspondentes à extração de minerais e geração de material inorgânico respirável em suspensão. Para o cenário com 92,3% de material reciclado estabeleceu-se que os principais efeitos negativos corresponderam à emissão de respiráveis orgânicos e à categoria de acidificação/eutroficação. Ao comparar os dois cenários detectou-se uma atenuação do impacto nas categorias de extração de minerais e respiráveis inorgânicos. Como consequência do uso de material reciclado neste produto reduziram-se notavelmente os impactos globais em 231% em termos do indicador *Pt*.

Palavras chave

Avaliação do impacto ambiental, ACV, bronce, reciclagem.

Introducción

El análisis de ciclo de vida (ACV) es una de las herramientas más difundidas en la evaluación de impacto ambiental de los productos durante cada una de las etapas de su ciclo de vida. Aunque su aplicación en Colombia no es muy amplia, algunas universidades del país han realizado algunos proyectos y publicado material al respecto (Monroy *et al.*, 1999; Fúquene y Córdoba, 2007; Medina *et al.*, 2006). Esta situación obedece a que sólo de manera reciente se ha iniciado la consolidación de una masa crítica de investigadores alrededor de estos temas y no se dispone de bases de datos públicas de información local de inventario y evaluación de procesos mediante ACV.

Según datos de 2007 de la Cámara de Fedemetal, de la Asociación Nacional de Industriales (ANDI), la mayoría del cobre utilizado en Colombia procede de chatarra, ya que la minería respectiva es casi inexistente (Lesmes, 2009). De acuerdo con estadísticas del Ministerio de Minas y Energía (2007), se especifica que la producción minera de cobre ha disminuido año tras año, al pasar de 10.089 toneladas en 1989 a 4.196 toneladas en 2007.

Al revisar los planteamientos de los representantes gremiales del sector, reunidos para encontrar alternativas a la problemática de abastecimiento del mercado interno, se han encontrado tres importantes aspectos respecto al mineral: (a) la cadena de abastecimiento se basa en la actividad del reciclaje, mayoritariamente de manera informal; (b) la producción nacional es escasa, lo cual genera desabastecimiento, y (c) el aumento de la demanda internacional ha incrementado los precios internos y ha aumentado las exportaciones del cobre, lo que afecta su disponibilidad para el consumo interno (Ministerio de Minas y Energía, 2007).

En Colombia se consumen alrededor de 30.000 toneladas/año de cobre, de las cuales aproximadamente el 43% proceden de material importado. De la totalidad del cobre consumido, el 62% es cobre rojo (94% puro) y el restante 38% es cobre amarillo (bronce y latón) (Lesmes, 2009).

1. Aplicación del análisis de ciclo de vida

El cobre se utiliza en la electrónica, la construcción, el transporte de agua y gas, al igual que en el área de comunicaciones. Este elemento, junto con el bronce, ha sido el material seleccionado en el sector de la construcción para elaborar tuberías, grifos, válvulas y accesorios (World Copper Fact Book, 2007). De acuerdo con estadísticas presentadas en el mismo reporte, en el 2007, hubo una producción minera de 15 millones de toneladas en el mundo.

Al tener en cuenta la importancia del cobre como material para diferentes sectores industriales y el aprovechamiento del mineral a partir de desperdicios y desechos provenientes de la actividad del reciclaje, varios grupos de investigación de la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana se plantearon un proyecto de evaluación del impacto ambiental de uniones roscadas para tubería fabricadas en aleación de cobre con estaño (bronce) bajo dos diferentes escenarios de composiciones: 100% de materia prima virgen y 92,3% de material reciclado, para identificar los impactos ambientales en cada escenario y la manera como la incorporación de material reciclado afecta el impacto ambiental del producto. El porcentaje de escenario del reciclaje obedece a que se asumen pérdidas en el proceso industrial y un porcentaje de material usado no se recupera y va a dar a los rellenos sanitarios.

1.1 Unidad funcional

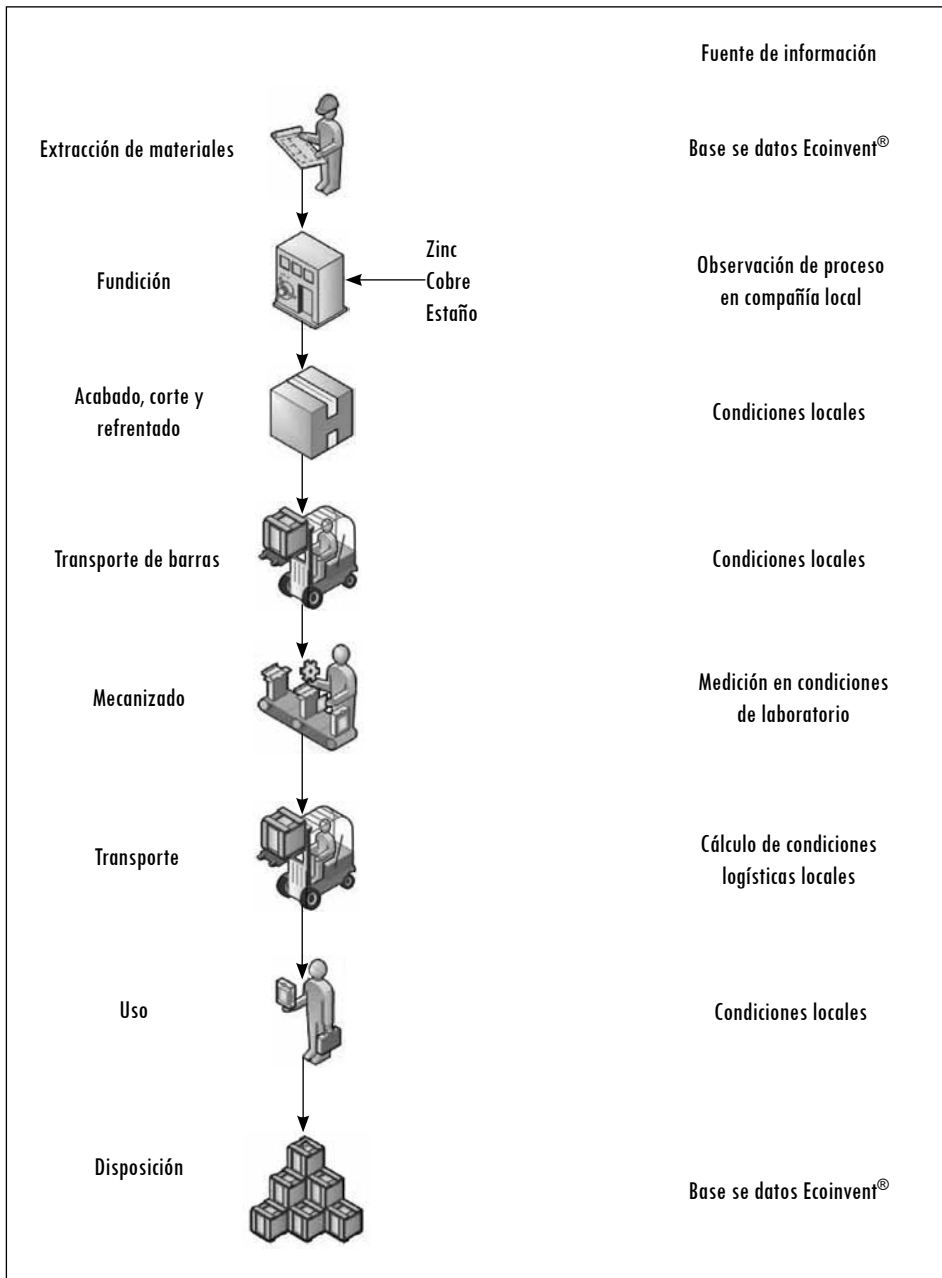
El producto seleccionado correspondió a uniones roscadas para tubería en bronce de media pulgada para manejo de fluidos, con un peso de 256 gramos. El producto bajo análisis estaba compuesto de dos partes: un elemento hembra y un elemento macho.

1.2 Límites del sistema

El sistema bajo análisis inicia en la extracción de materia prima y finaliza en la disposición final del producto. Se tomaron en cuenta las etapas de extracción y transformación de materias primas; procesamiento (extrusión de barras, corte y maquinado de unión), uso y disposición del producto, y sistema que difiere del proceso industrial tradicional (Figura 1).

El inventario de entradas y salidas durante la etapa de extracción de materiales (cobre, estaño y zinc) se basó en los procesos definidos en la base de datos Ecoinvent[®], que fue elaborada bajo un convenio de cooperación entre The Swiss Federal Offices y el Instituto de Investigación ETH, que contiene 2,5 millones

Figura 1. Árbol de procesos



Fuente: presentación propia de los autores.

de conjuntos de datos para productos y servicios en los sectores de energía, agricultura, transporte, materiales de construcción, químicos, pulpa y papel, tratamiento de residuos y sector agrícola para diferentes continentes (Frischknecht *et al.*, 2005). De acuerdo con Ossés de Eicker, para países con tecnología media como Colombia, la base de datos en referencia es aplicable: “Los datos de los años 90 y posteriores al 2000 reflejan la situación actual de estos países latinoamericanos” (2010, p. 153).

Los datos de la fase de procesamiento se recolectaron mediante la observación de la fundición de metal y la extrusión de una barra de bronce en las instalaciones de una organización dedicada a dicha labor, según las especificaciones para la fabricación del prototipo del estudio, que para este caso correspondieron a una barra de 30 mm de diámetro y 1 m de largo.

El prototipo de la unión roscada se fabricó en el Centro Tecnológico de la Pontificia Universidad Javeriana, mediante el corte, la perforación con broca y el mecanizado de la barra de bronce para el roscado, por medio de equipos de control numérico computarizado, donde fue recolectada la información de los procesos conducidos en condiciones de laboratorio.

En la etapa asociada con el uso del producto se tuvo en cuenta tanto la distancia que el cliente se desplaza para comprar el producto como la distancia al lugar donde va a ser utilizado, la cual fue establecida en 10 km. Respecto a la disposición, una vez el producto ha cumplido su ciclo de vida útil, se contempló en el relleno sanitario. En el escenario del material reciclado se incluyeron los efectos ambientales de la recolección del material y el consumo de energía en la reincorporación del material al ciclo productivo.

La información del inventario que permitió ajustar la base de datos provino de los procesos analizados en la compañía local donde fue extruida la barra y la fabricación del prototipo en condiciones del laboratorio de la Universidad. La información del transporte provino de los cálculos de la logística para la consecución del material y entrega en los lugares de procesamiento, así como de la distribución del material para su uso por parte del cliente final.

A partir de la información recolectada se desarrolló el balance de materiales de la unión roscada, con lo que se ajusta el valor de impacto de acuerdo con las condiciones locales y específicas del procesamiento del material. Por ejemplo, para el *mix* de tipos de energía se especificó el tipo de fuente local asociado para algunos procesos a hidroeléctricas y para otros al uso de combustibles como el ACPM, lo cual correspondió a las condiciones específicas del análisis.

1.3 Metodología

Para valorar el impacto ambiental se utilizó el ACV productos, sustentado en el Ecoindicador 99, y para procesar la información recolectada se usó la herramienta informática Simapro®. El Ecoindicador 99 evalúa tres categorías de impacto principales que corresponden a lo siguiente: agotamiento de los recursos naturales, efectos en la biodiversidad y daño a la salud de las personas.

En el establecimiento del impacto ambiental se tomaron en cuenta tres diferentes aspectos: análisis de inventario, evaluación del impacto e interpretación del análisis (Ministry of Housing, 2000). En el inventario se determinan los tipos y cantidades de entradas y salidas de recursos a los procesos (por ejemplo, materia prima, energía y desechos). En la evaluación del impacto se clasifica el inventario de acuerdo con cada categoría de impacto y este último se calcula usando índices de medición para así establecer la significancia de los impactos (Icontec, 2003).

Por ejemplo, en la categoría de agotamiento de los recursos naturales se usa un índice de medición de la energía adicional requerida por las futuras generaciones para la extracción de los recursos. Entre tanto, la medición de los efectos en la biodiversidad utiliza el índice de desaparición potencial de especies (PDF o *Potentially Disappeared Fraction*), y en cuanto a la medición del daño a la salud de las personas, se emplea un índice de medición de los años de vida perdidos debido a enfermedades o muertes prematuras, conocido como DALY, por su sigla en inglés (Ministry of Housing, 2000).

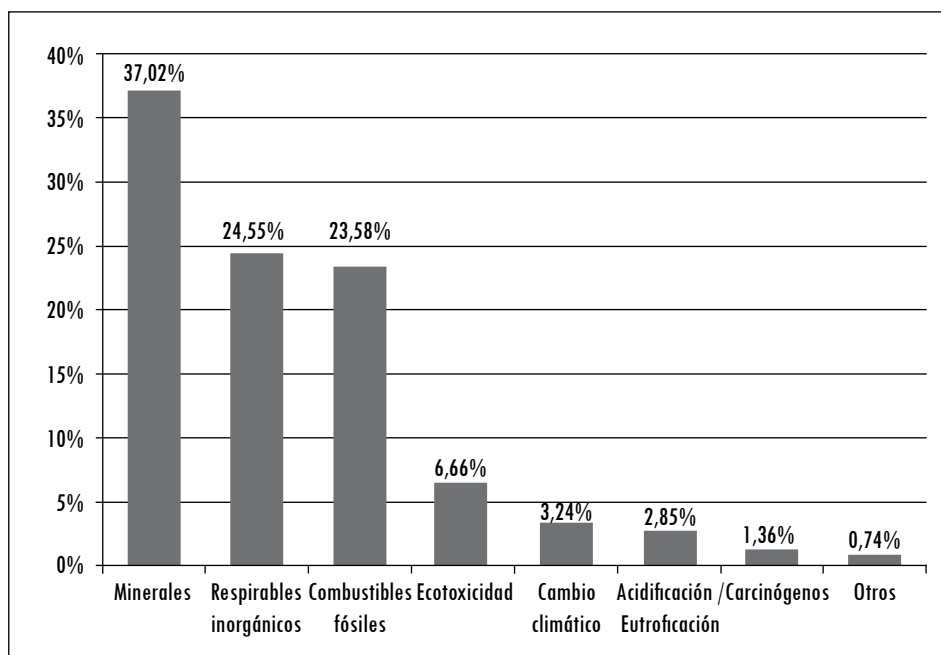
Finalmente, la interpretación del ACV es el resultado de la ejecución del inventario y la evaluación, con el fin de determinar conclusiones y recomendaciones en relación con los hallazgos en las categorías de impacto y las etapas del ciclo de vida (Icontec, 2003).

2. Resultados

En el escenario de productos con formulación de 100% de materia prima virgen (Figura 2) se encontró que los mayores efectos ambientales se alcanzaron en las categorías de impacto correspondientes a la extracción de minerales (37%), generación de material inorgánico en suspensión dentro de la atmósfera (25%), uso de combustibles fósiles (24%) y ecotoxicidad (7%). Tales impactos se originaron en las etapas de la cadena productiva relacionadas con los procesos de extracción de materiales (en este caso minerales), así como fundición de bronce y transformación del cobre. Otros estudios señalan que “los mayores impactos en tuberías de acero utilizadas para calefacción están asociados a la

producción de los materiales (extracción y producción) empleados para su fabricación” (Fröling, Holmgren y Svanström, 2004, p. 134).

Figura 2. Categorías de impacto: escenario 100% materia prima virgen



Fuente: presentación propia de los autores.

Durante la extracción de minerales se afecta la calidad del recurso extraído y la cantidad de energía requerida para las extracciones futuras. Cuando ha habido varios años de explotación, la cantidad de energía requerida para extraer material de una mina o de una extensión de tierra es superior a la inicial, ya que la accesibilidad al material en ese espacio físico es mucho más compleja y necesita mayor número de estudios y equipos y porque al haber agotamiento de recursos se precisa explotar en otros parajes. Por otro lado, la explotación de minas de cielo abierto afecta el uso del suelo en relación con actividades agrícolas, de silvicultura y recreativas, que inicialmente fueron desarrolladas en dichos espacios (Glynn y Heinke, 1999).

Durante la extracción de materiales del caso en estudio se encontró que la contribución al impacto ambiental correspondió principalmente al cobre (83,1%), estaño (11,6%) y zinc (5,09%) entre otros elementos con una menor participación. Respecto al material inorgánico respirable se determinó que los principales

componentes correspondieron a óxidos de nitrógeno (47,8%), óxidos de azufre (32,4%) y material particulado menor a 10 micras (11,4%) (Fúquene, 2007), entre otros elementos provenientes de la extracción del mineral y del consumo de combustibles durante los procesos de fundición de cobre.

En relación con la categoría de ecotoxicidad, hay que tener en cuenta los efectos generados por los *metales pesados*. Según la Norma Oficial Mexicana (NOM-187-SSA1), “los metales pesados cuentan con un peso atómico entre 63 y 200 y una gravedad específica mayor de 4,0” (Comité Consultivo Nacional de Normalización de Información Comercial de México [CCNNIC], 2003). Dependiendo de la concentración, la forma química y su acumulación en el organismo, los metales pesados pueden afectar el metabolismo y la salud de las personas cuando se alcanza una dosis tóxica o letal. Dentro de los elementos que se clasifican como metales pesados se encuentran, entre otros: el aluminio, el cadmio, el cobre, el cromo, el estaño, la plata y el plomo (Méndez-Fajardo, 2006):

El cobre es esencial para mantener buena salud, sin embargo, la exposición a dosis altas puede ser perjudicial. A nivel de salud ocupacional, durante la ejecución de los procesos industriales que manipulan el metal en las líneas de producción, la exposición prolongada a polvos de cobre puede irritar la nariz, la boca, los ojos y causar dolores de cabeza, mareo, náusea y diarrea. La ingestión intencional de niveles altos de cobre puede producir daño del hígado y los riñones y puede causar la muerte. (Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades [ATSDR], 2004, p. 5)

En cuanto al estaño, segundo componente del bronce, sus compuestos inorgánicos:

[...] generalmente no causan efectos perjudiciales debido a que entran y abandonan el cuerpo rápidamente cuando se respiran o ingieren. Sin embargo, de acuerdo con estudios clínicos [se reporta] que personas que [injirieron] grandes cantidades de estaño inorgánico sufrieron dolores de estómago, anemia, y problemas del hígado y del riñón. (ATSDR, 2005, pp. 4-5)

Adicionalmente:

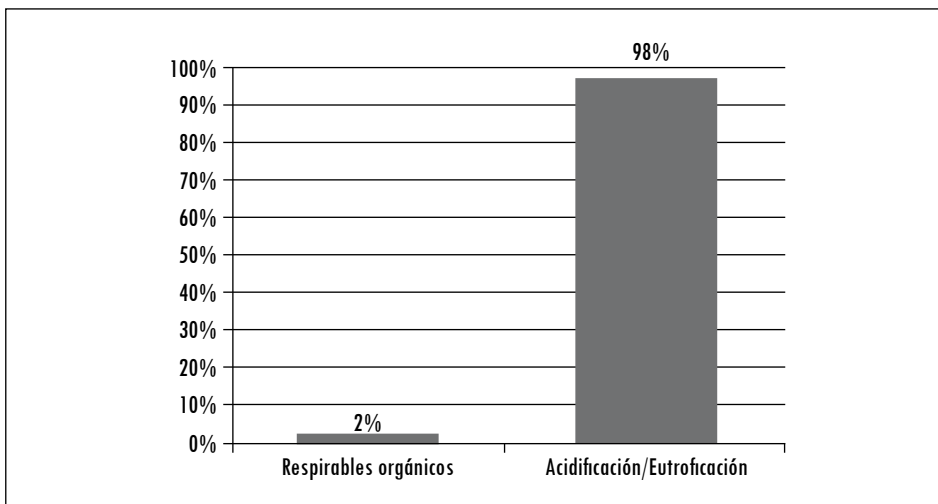
[...] se han descrito casos de irritación de la piel, los ojos y las vías respiratorias, efectos gastrointestinales y problemas neurológicos en seres humanos expuestos brevemente a altas cantidades de algunos compuestos orgánicos de estaño. Algunos estudios en animales sugieren que también pueden afectarse los órganos reproductivos de animales machos. No hay estudios de cáncer en seres humanos expuestos a compuestos orgánicos de estaño. (ATSDR, 2005, pp. 4-5)

Respecto al tema de disponibilidad de recursos, se prevé que una de las maneras de prevenir su agotamiento está relacionada con la incorporación de material reciclado en los ciclos productivos, ya que este tipo de prácticas evita (para el caso específico de los metales) el cambio del uso del suelo por explotaciones mineras y permite enfocarse en mejorar los procesos de logística en reversa para la recolección de material usado y la aplicación de los controles operacionales requeridos en la transformación sostenible de los materiales reciclados.

Luego de analizar un segundo escenario con composición del 92,3% de material reciclado en el producto final, se encontró una mejora global del producto en todas las categorías de impacto. En esta alternativa se presentaron impactos en algunas categorías, al igual que atenuación de impactos en otras.

Los principales efectos negativos correspondieron a la emisión de respirables orgánicos y acidificación/eutroficación. La categoría de acidificación estuvo afectada por las emisiones de óxidos de nitrógeno y dióxidos de sulfuro, provenientes de la combustión de los procesos de fundición (Fúquene y Córdoba, 2007) (Figura 3).

Figura 3. Impactos en el escenario de material reciclado

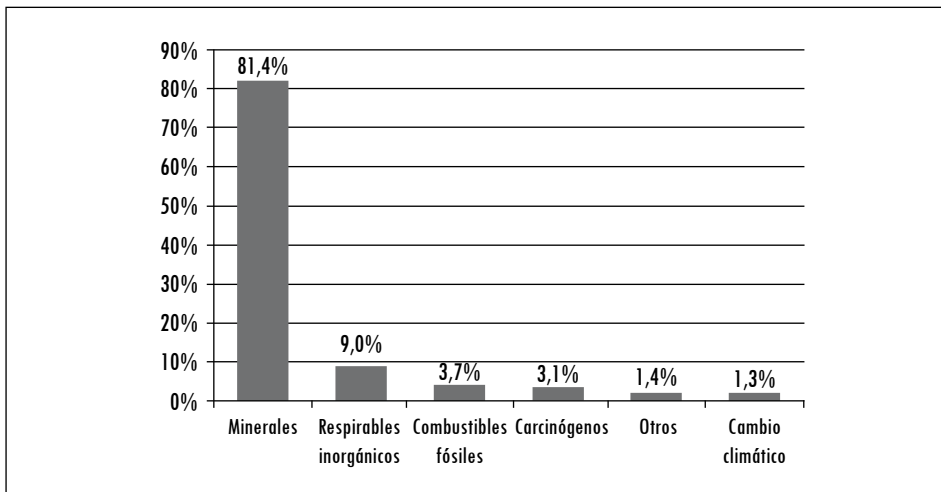


Fuente: presentación propia de los autores.

Otras investigaciones sobre los impactos de uniones en bronce utilizadas en las tuberías de polietileno confirman altos impactos en términos de acidificación; esto si se toma en cuenta la pequeña cantidad de bronce en todo el sistema

(mixto polietileno-bronce) (Perzon, Johansson y Fröling, 2007). Las principales atenuaciones en este escenario correspondieron a extracción de minerales y respirables inorgánicos (Figura 4).

Figura 4. Atenuación de impactos



Fuente: presentación propia de los autores.

Se presentó una notable mejora en las categorías de agotamiento de minerales (390%), generación de respirables inorgánicos (148%) y combustibles fósiles (121%), que contribuyen de manera positiva al desempeño ambiental del producto, al disminuirse la extracción y uso de materia prima virgen.

El uso de material reciclado en los procesos industriales debe convertirse en un aspecto prioritario para las organizaciones, a fin de cumplir con su responsabilidad ambiental. Los diferentes actores de la sociedad pueden facilitararlo mediante prácticas responsables, en los hogares y municipios, separando los productos y entregando los materiales en desuso en lugares adecuados para su tratamiento y disposición final.

Es importante, sin embargo, tomar en cuenta que reincorporar materiales usados en los procesos implica generar un impacto durante las actividades de reprocesamiento, por lo que es necesario tomar las medidas necesarias en la planta respecto al control de materiales particulados y aguas de desecho provenientes de dichas actividades.

3. Conclusiones

El uso de material reciclado en la fabricación de uniones roscadas para tubería genera una notable reducción en los impactos globales del producto, en términos del indicador Pt , del 231%. La selección de materiales y la determinación de composición de material reciclado de producto durante la fase de diseño se convierten en un asunto de suma importancia para mejorar el desempeño ambiental de la cadena de suministro, por cuanto allí es donde se definen aspectos como el tipo de procesos que se van a utilizar, las características de calidad del producto y su absorción por parte de la naturaleza.

Igualmente, la selección del material —realizada también en la etapa de diseño— determina la toxicidad del producto a lo largo de su ciclo de vida y la forma como esta será manejada. En el caso específico de estudio, en el escenario donde se incorpora material reciclado se modifica la magnitud de los impactos para las categorías que más preocupan al ser humano, como son el agotamiento de los minerales, la contaminación atmosférica y el uso de combustibles fósiles. Esto evidencia que, adicional a una tendencia o moda de años recientes, el reciclaje de productos contribuye a la preservación de los recursos de la naturaleza.

¿Cuáles son las limitaciones del estudio? El uso de la herramienta de ACV no es muy difundido en Colombia, pero se ha empezado a crear una masa crítica de investigadores en este tema. Se requiere aumentar los esfuerzos en la generación de proyectos y así contar con información disponible alrededor del inventario y evaluación local de procesos mediante ACV.

La falta de cohesión de los gremios para generar confianza en sus empresas afiliadas restringe el planteamiento de propuestas alrededor del estudio de impacto de las cadenas productivas. En este caso, las limitaciones estuvieron relacionadas con los siguientes aspectos: la entrega de información específica de los procesos por parte de las organizaciones (asociada al temor de suministrar datos que pudieran afectar su imagen en cuanto el desempeño ambiental), el uso de información de referencia de procesos internacionales (que puede diferir respecto a las condiciones locales) y el uso de un modelo de medición europeo como el Econdicador 99 (en el que las reglas de asignación presentan diferencias para el factor de evaluación de la energía, en el que se difiere en impacto en cuanto a lo que sucede en Europa; esto si se toma en cuenta que las fuentes de generación, para el caso de Colombia, están mayormente asociadas a hidroeléctricas que a térmicas).

Es importante comentar que algunos investigadores afirman que los procesos presentados en la base de datos Ecoinvent[®] son también válidos para países

no europeos, especialmente en los casos de extracción de minerales (asociado al estudio presentado) y de recursos energéticos que ocurren fuera de Europa (Frischkanecht *et al.*, 2005).

De todas maneras, es necesario desarrollar indicadores locales con reglas de asignación definidas de acuerdo con las condiciones de biodiversidad y disponibilidad de recursos de Colombia, a fin de que el uso de la metodología del Ecoindicador y sus resultados no se vean afectados por las diferencias existentes entre indicadores locales y europeos.

Del estudio presentado en el artículo es importante mencionar que estuvo orientado a presentar el mejoramiento del desempeño ambiental del producto bajo diferentes escenarios de composición de material reciclado y a la importancia de reincorporar el producto posconsumo como parte de las opciones de prevención de la contaminación, necesarias en una sociedad. Desde esta perspectiva, al orientarse el trabajo hacia la comparación del desempeño con diferentes escenarios y no únicamente hacia la determinación del impacto del producto bajo una condición local específica, se podría utilizar una metodología como la del Ecoindicador 99.

En futuros trabajos es recomendable incluir un mayor número de compañías en el estudio para que la información recolectada sobre los procesos sea representativa del sector bajo análisis y pueda ser incorporada en bases de datos locales disponibles al público para su revisión.

Referencias

- AGENCIA PARA SUSTANCIAS TÓXICAS Y EL REGISTRO DE ENFERMEDADES (ATSDR). *Resumen de salud pública: cobre*, 2004.
- AGENCIA PARA SUSTANCIAS TÓXICAS Y EL REGISTRO DE ENFERMEDADES (ATSDR). *Resumen de salud pública: estaño y compuestos de estaño*, 2005.
- COMITÉ CONSULTIVO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN DE INFORMACIÓN COMERCIAL DE MÉXICO (CCNNIC). Norma Oficial Mexicana (NOM-187-SSA1), 2003.
- FRISCHKNECHT, R. *et al.* The ecoinvent database: Overview and methodological framework. *International Journal of Life Cycle Assessment*. 2005, vol. 10, núm. 1, pp. 3-9.
- FRÖLING, M.; HOLMGREN, C. y SVANSTRÖM, M. Life cycle assessment of the district heat distribution system. *International Journal of Life Cycle Assessment*. 2004, vol. 9, núm. 2, pp. 130-136.
- FÚQUENE, C. y CÓRDOBA, N. Selection of materials through the LCA* for pipes' threaded unions. *Third International Conference on Life Cycle Management*, August 27 to 29, 2007. pp. 1-196.

- GLYNN, J. y HEINKE, G. *Ingeniería ambiental*. México: Prentice Hall, 1999.
- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS (Icontec). *Norma Técnica Colombiana ISO 14040. Gestión ambiental: análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia*. Bogotá, 2003.
- INTERNATIONAL COPPER STUDY GROUP. *World Copper Fact Book*. Lisboa, 2007.
- LESMES, J. M. Entrevistado por J. Lara. Bogotá, 2009.
- MEDINA, A. *et al.* Evaluation of energy use and some environmental impacts for greenhouse tomato production in the high altitude tropics. ISHS Acta Horticulturae 718. *III International Symposium on Models for Plant Growth, Environmental Control and Farm Management in Protected Cultivation*, octubre de 2006.
- MÉNDEZ-FAJARDO, S. *Potencialidad de la presencia de cadmio en los granos del arroz sembrado en Colombia* [Tesis de Maestría]. Bogotá: Universidad de los Andes, Maestría en Ingeniería Civil con Énfasis Ambiental, 2006.
- MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA DE COLOMBIA. *Producción y exportaciones de cobre en Colombia* [documento en línea]. 2007 <http://www.simco.gov.co/Portals/0/Panorama/Analisis_Cobre.pdf> [Consulta: 09-12-2009].
- MINISTRY OF HOUSING. *Communications Directorate. Ecoindicador 99. Manual for designers*. The Netherlands, 2000.
- MONROY, N.; VAN HOOE, B. y ESPINOSA, J. C. LCA (life cycle analysis): una herramienta de la industria para conciliar la crisis ambiental y el desarrollo empresarial. *Revista de Ingeniería*. 1999, núm. 9, pp. 44-51.
- OSSÉS DE EICKER, M. *et al.* Using non-local databases for the environmental assessment of industrial activities: The case of Latin America. *Environmental Impact Assessment Review*. 2010, vol. 30, núm. 3, pp. 145-157.
- PERZON, M.; JOHANSSON, K. y FRÖLING, M. Life cycle assessment of district heat distribution in suburban areas using PEX pipes insulated with expanded polystyrene. *International Journal of Life Cycle Assessment*. 2007, vol. 12, núm. 5, pp. 317-327.