

Reciclaje de aluminio: oportunidades de desarrollo en Bogotá (Colombia)

Aluminum recycling: development opportunities in Bogota (Colombia)

Federico Millán Delgado¹, Diana Pilar Sánchez García² y Jhon Jairo Olaya Flórez³

Fecha de recepción: 23 de julio de 2014.

Aceptación: 7 de julio de 2015.

Recibido versión final: 20 de agosto de 2015.

Resumen

La resistencia a la corrosión y ligereza que caracterizan al aluminio permiten que este metal y sus aleaciones sean sustitutos de materiales como el acero en diversas aplicaciones industriales como: construcción, autopartes, empaques, maquinaria y aeronáutica. En consecuencia, la demanda de aluminio se ha incrementado, así como la búsqueda de minas de bauxita, mineral a partir del cual se obtiene este metal. La transformación de la bauxita en aluminio se realiza mediante la explotación y extracción del mineral que posteriormente es sometido a procesos químicos de Bayer y de electrólisis, los cuales generan emisiones nocivas para el medio ambiente y demandan un alto consumo de energía. Ante la necesidad de reducir los costos de producción del proceso y su impacto ambiental, una alternativa como fuente de materia prima es el reciclaje de aluminio, como lo indican investigaciones sobre el aprovechamiento de materiales en países como Brasil y Estados Unidos que han demostrado la viabilidad de obtener aluminio a partir de residuos metálicos. Lo anterior plantea un interrogante sobre los avances en esta materia en Bogotá, una ciudad con una cadena de reciclaje informal de numerosos eslabones y con escasa regulación que ha generado pocos logros en comparación con otras capitales del mundo.

Palabras clave

Producción aluminio primario y secundario, cadena de reciclaje, proceso reciclaje aluminio.

Abstract

The corrosion resistance and lightness of aluminum have allowed this metal and its alloys to become a substitute for materials like steel, in several industrial

1. Ingeniero Industrial. Estudiante de Maestría en Ingeniería - Materiales y Procesos, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Nacionalidad: colombiano. Email: fmilland@unal.edu.co

2. Ingeniera Ambiental y Sanitaria. Estudiante de Maestría en Ingeniería - Materiales y Procesos, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Nacionalidad: colombiana. Email: dipsanchezga@unal.edu.co

3. PhD en Ingeniería de Materiales, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Nacionalidad: colombiano. Email: jjolayaf@unal.edu.co

applications such as construction, automotive parts, packaging, machinery and aviation. Consequently, demand for aluminum has increased, as the search for bauxite mines, the mineral from which this metal is obtained. The transformation of bauxite into aluminum is done through the exploitation and extraction of the mineral, which then undergoes the Bayer and electrolysis chemical processes that generate harmful emissions to the environment and require high energy consumption. Given the need to reduce production costs and environmental impacts, an alternative source for this raw material is aluminum recycling, as noted by research conducted on the use of materials in countries like Brazil and the United States, which have shown the feasibility of obtaining aluminum from scrap metal. This raises a question about the progress of this topic in Bogotá, a city with an informal recycling chain with many intermediaries and a weak regulation that has had few achievements in comparison to other capital cities.

Keywords

Primary and secondary aluminum production, recycling chain, aluminum recycling process.

Introducción

El aluminio, así como el magnesio y el titanio, hacen parte de la familia de los “metales ligeros” (Polmear 1996) que se caracterizan por tener una baja densidad y por sustituir materiales como el acero en estructuras y componentes, ya que ayudan a reducir su peso. El aluminio tiene un amplio número de aplicaciones en diversos sectores industriales (construcción, automotriz, empaques o envases, maquinaria, aeronáutica) debido a su ligereza y su alta resistencia a la corrosión (Menzie et al. 2010; Echavarría y Orrego 2012; Tillová et al. 2012a; Tsakiridis 2012). Uno de sus principales beneficios ha sido reducir el peso de los vehículos, y en consecuencia, el consumo de combustible (Das et al. 2007a) pues cada kilogramo de acero que es sustituido genera un ahorro de dos galones de combustible (The Aluminum Association 2011). Lo anterior ha contribuido a una mayor demanda de aluminio, a la búsqueda de nuevas fuentes de bauxita y a considerar los residuos de aluminio como una fuente alternativa de materia prima (Rombach 2013) ya que de éstos también es posible obtener aluminio con buenas propiedades mecánicas, aunque su proceso de transformación requiere un mayor control de calidad. De esta forma se definen

dos clases de aluminio: primario, aquel producido de la forma tradicional; y secundario, el cual resulta de la recuperación de residuos.

El reciclaje de aluminio ha presentado resultados positivos para la industria y la sociedad en general, ya que es posible generar beneficios monetarios para los recicladores y las ciudades (Ozer et al. 2013); reducir los niveles de consumo de energía durante la etapa de producción al pasar de 45 kWh/kg a 2,8 kWh/kg (Das 2006a; Das y Kaufman 2008; Tillová et al. 2012a), lo que hace el proceso más económico; y reducir las emisiones de CO₂ durante la obtención del metal, pues la producción de aluminio secundario genera un 5% del CO₂ resultante de la producción de aluminio primario (Tillová et al. 2012a, 2012b). Debido a estos beneficios, países como Brasil y Estados Unidos han optado por reducir la explotación y consumo de bauxita e incrementar la tasa de reciclaje y los niveles de producción de aluminio secundario a través de la implementación de procesos de separación y clasificación de residuos para la remoción de impurezas, como plástico o metales ferrosos, y así obtener un metal de calidad semejante a la del primario (Valentim y Kovaleski 2010; The Aluminum Association 2011).

En el caso de Bogotá, se ha considerado tradicionalmente que los residuos metálicos son basura, razón por la cual se disponen en rellenos sanitarios, y se ha ignorado su capacidad de aprovechamiento, que para el caso del aluminio es de un 100% (White 2012), cualidad que lo convierte en un material sostenible ya que puede ser reutilizado numerosas veces sin perder sus propiedades y características originales (Valentim y Kovaleski 2010; The Aluminum Association 2011). Las debilidades que presenta la ciudad en este tema, y por ende las oportunidades de desarrollo del sector reciclador que se están desaprovechando, son evidenciadas por la Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos (UAESP) en su informe del año 2011, “Caracterización de los residuos sólidos residenciales generados en la ciudad de Bogotá”, donde se explica que de las 2.350 ton/día de residuos sólidos residenciales que se generan en la capital, el 0,14% es aluminio (Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos 2011a), es decir que cerca de 3,29 ton/día de aluminio son enterrados.

Aluminio primario

El aluminio, en forma del mineral bauxita, es uno de los metales más abundantes en la corteza terrestre ya que equivale al 8% de su superficie en peso (Reuter et al. 2005a; Tsakiridis 2012; Ediz y Savas 2013) y es obtenido a través de dos procesos: Bayer y la electrólisis.

El proceso de Bayer, patentado por Karl Josef Bayer en 1887, consiste en obtener alúmina (Al_2O_3) a partir de la bauxita que es extraída del suelo por medio de un proceso de trituración, adición (soda cáustica) y de fundición; proceso del cual resultan entre 75 y 120 millones toneladas de lodos rojos al año a nivel mundial, según Li (2008) y Tsakiridis (2012), respectivamente. Este tipo de residuos tienen un impacto ambiental negativo debido a su alto contenido de hierro (Reuter et al. 2005b) y su reutilización es considerada un reto para la industria debido a que su alta alcalinidad y contenido de metales pesados genera material radioactivo (The Aluminum Association 2011).

En la electrólisis, la alúmina es transformada en aluminio al aplicar corriente eléctrica a una mezcla de Al_2O_3 y criolita con el fin de descomponer la alúmina en oxígeno y aluminio, los cuales son depositados en un ánodo y un cátodo (electrodos de carbono), respectivamente. Para realizar la electrólisis es necesario emplear entre 13.000 kWh (Li 2008) y 45.000 kWh (Tillová et al. 2012a) por cada tonelada de aluminio producido. Estas cifras convierten la producción de aluminio primario en una actividad de alto costo y por este motivo la industria se ha visto obligada a ubicarse en zonas con servicio eléctrico de menor costo (Reuter et al. 2005b).

En términos de las fuentes de suministro de bauxita, este mineral se encuentra en minas ubicadas en regiones tropicales como Australia, Guinea, Brasil, Jamaica y China. Según Reuter et al. (2005a), para 2005 el planeta contaba con aproximadamente 23×10^9 toneladas en reservas de bauxita para cubrir una demanda mundial cercana a los 100 millones ton/año. Al evaluar los niveles de producción y de consumo de aluminio por países, para 2002 el principal consumidor era Estados Unidos con un total de 8,2 millones de toneladas (Chinchay 2005), mientras el productor líder en ese mismo periodo era China con un 17% del total fabricado en el planeta, seguido por Rusia, Canadá, Estados Unidos, Australia, Brasil y Noruega (Chinchay 2005). Por continente, el International Aluminum Institute (2014) señala que Asia y Europa cuentan con el mayor volumen de producción de aluminio primario desde hace una década (Tabla 1), reportando una participación en 2004 de 32% y 29%, mientras que para 2014 fue de 61% y 17%, respectivamente (Tabla 2).

Aluminio secundario

El reciclaje de aluminio es una práctica que se realiza desde hace 38 años y se ha fortalecido con el paso de los años gracias a la capacidad del material de conservar sus propiedades físicas y químicas originales, sin importar el número de veces que sea recuperado. Evidencias de este comportamiento se encuentran en estudios realizados por autores como

Tabla 1. Producción de aluminio primario por continente (miles de ton/año).

Año	África	Asia	América	Europa	Oceanía
2014	1.745	26.369	6.106	7.279	2.035
2013	1.811	24.375	6.823	7.520	2.106
2012	1.639	22.289	6.903	7.928	2.186
2011	1.805	20.319	7.154	8.346	2.306
2010	1.742	18.631	6.994	8.053	2.277
2009	1.681	17.364	7.267	7.839	2.211
2008	1.715	17.028	8.443	9.276	2.297
2007	1.815	16.305	8.200	8.765	2.315
2006	1.864	12.842	7.826	8.412	2.274
2005	1.753	10.945	7.773	8.546	2.252
2004	1.711	9.424	7.466	8.434	2.246

Fuente: elaboración propia a partir de International Aluminum Institute (2014).

Tabla 2. Porcentaje de participación en producción aluminio primario por continente.

Año	África	Asia	América	Europa	Oceanía
2014	4%	61%	14%	17%	5%
2013	4%	57%	16%	18%	5%
2012	4%	54%	17%	19%	5%
2011	5%	51%	18%	21%	6%
2010	5%	49%	19%	21%	6%
2009	5%	48%	20%	22%	6%
2008	4%	44%	22%	24%	6%
2007	5%	44%	22%	23%	6%
2006	6%	39%	24%	25%	7%
2005	6%	35%	25%	27%	7%
2004	6%	32%	25%	29%	8%

Fuente: elaboración propia a partir de International Aluminum Institute (2014).

Frees (2008), quien reportó entre 1993 y 2003 una reducción de un 2% en la producción de aluminio primario en los países occidentales, material que fue sustituido con aluminio secundario (Figura 1). Por su parte, Chinchay (2005) identificó un crecimiento del 33% en la producción de aluminio secundario a nivel mundial entre 1975 y 1999, al pasar de 3,1 a 9,4 millones de toneladas métricas (TM).

Una de las causas del fortalecimiento del aluminio secundario es el cambio del modelo productivo que ha pasado de ser lineal a uno de tipo cíclico en el cual hay menos explotación de bauxita y un menor volumen de material dispuesto en rellenos sanitarios, lo que ha permitido una mayor reutilización y reintegración de residuos en nuevos ciclos productivos. La eficiencia energética es otra de las ventajas de este modelo productivo ya que con un 5% de la energía empleada para obtener una tonelada de aluminio primario es posible conseguir la misma cantidad de aluminio secundario (Torre et al. 2009; Brommer et al. 2010; Baeyens y Dewil 2010; Tillová et al. 2012a y 2012b; Ozer et al. 2013).

Al considerar posibles afectaciones en la atmósfera, este nuevo modelo productivo también ha contri-

buido favorablemente, pues ha permitido reducir la generación de emisiones (Hong et al. 2010; Tillová et al. 2012a; Tsakiridis 2012). Frischknecht (2010) es uno de los autores que apoya esta afirmación al señalar que la industria de aluminio primario es una de las responsables del cambio climático, pues mientras en el proceso de transformación de la bauxita en aluminio se generan 320 millones de toneladas al año de CO₂, durante el reciclaje de aluminio solo se emiten 20 millones de toneladas (Verran y Kurzawa 2008), lo cual equivale a una reducción del 84%.

Al entender la sostenibilidad como el uso responsable de los recursos para garantizar su disponibilidad para generaciones futuras, entonces el reciclaje de aluminio tiene como objetivo garantizar el máximo flujo de este metal en el transcurso del tiempo, por medio de dos técnicas de recuperación: ciclo cerrado (*closed-loop*) y ciclo abierto (*open-loop*) (Kamberović et al. 2009; Nounezi 2012). Según Kamberović et al. (2009), el ciclo cerrado consiste en fundir solo aquellos residuos que pueden transformarse en el producto original de forma directa (sin agregar nuevos materiales) y de los cuales se obtienen aleaciones forjadas, mientras

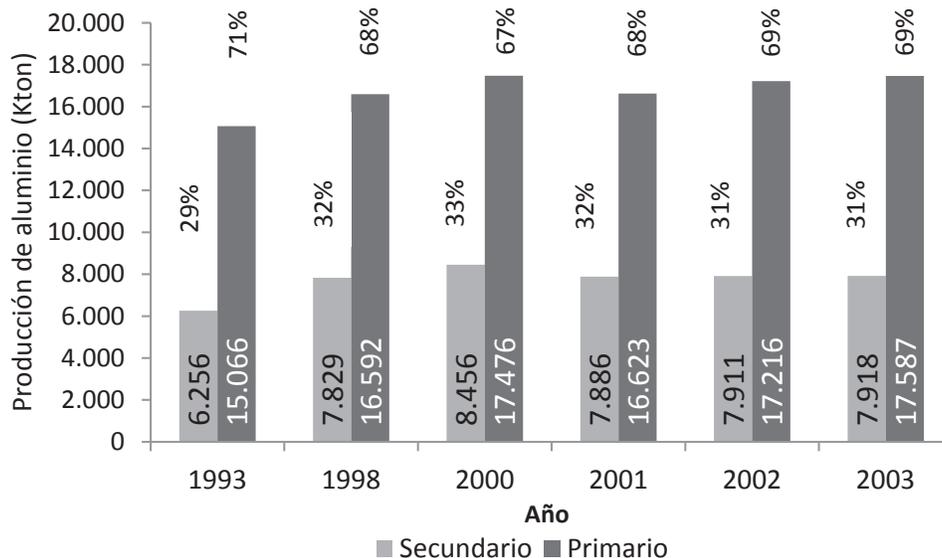


Figura 1. Producción (kton) y participación (%) de aluminio secundario y primario en países occidentales. Fuente: elaboración propia a partir de Frees (2008).

que en el ciclo abierto se adicionan otros metales, previo a la fundición de los residuos, para ajustar la composición de la aleación y así obtener aleaciones de moldeo.

El análisis del flujo del aluminio a nivel mundial, que ayuda a estimar el porcentaje de este metal que sigue en uso en un periodo de tiempo respecto al que fue fabricado en un periodo anterior, ha sido investigado por autores como McMillan (2011) y Menzie et al. (2010), y por institutos como European Aluminum Association (2004) y The Global Aluminium Recycling Committee (2006) a través del Análisis del Ciclo de Vida (LCA, por sus siglas en inglés), metodología que evalúa la carga ambiental que está asociada a un producto al considerar los recursos utilizados y las emisiones emitidas al ambiente durante cada una de las etapas de su fabricación (extracción, procesamiento, transporte, uso, reutilización, reciclado, disposición final). En dichos estudios se ha encontrado que ha habido un crecimiento significativo en el valor neto de aluminio agregado al flujo de este metal, respecto al que ya se encontraba disponible en el mercado en periodos anteriores, ya que presentó aumento de un 53% al pasar de 17,5 a 26,9 millones de toneladas métricas (TM) entre 2002 y 2007 (European Aluminum Association 2004; Kamberović et al. 2009; Dahmus 2014). Por otra parte, el volumen de material reciclado empleado por refundición tuvo un incremento del 8% al pasar de 34,8 a 37,8 millones de toneladas métricas (TM) entre 2006 y 2007 (Figura 2) (The Global Aluminum Recycling Committee 2006; Menzie et al. 2010).

Un aspecto importante en el flujo de aluminio es el nivel de consumo y su reutilización en los sectores industriales. En el caso de Estados Unidos, Gaustad et al. (2010) y The Aluminum Association (2011) afirman que el sector transporte ha contado con la mayor participación en el mercado del aluminio en 2005, 2008, 2009 y 2010 (Tabla 3), cuyo liderazgo según The Global Aluminum Recycling Committee (2006) se presentó inclusive a nivel mundial en 2007 (Figura 3). Sin embargo, el segundo consumidor

más grande de este mercado no fue el mismo para Estados Unidos y el resto del planeta, ya que esta posición fue ocupada por el sector de empaques (Gaustad et al. 2010; The Aluminum Association 2011) y el de la construcción (The Global Aluminum Recycling Committee 2006) respectivamente, en los años mencionados.

Al considerar el flujo del aluminio en términos del material secundario, las principales fuentes generadoras de residuos en el mundo en 2007 fueron el sector transporte y el de empaques con una participación del 42% y 28%, respectivamente (Figura 4) (The Global Aluminum Recycling Committee 2006). Una de las razones por las que el sector constructor ocupa el cuarto lugar, a pesar de ser el segundo consumidor, se debe al amplio ciclo de vida que tiene este metal en las edificaciones (30-50 años) (Das et al. 2007b), mientras que el tiempo de vida útil de una autoparte o un envase es menor, por lo cual retorna más rápido al flujo original. La Figura 5 muestra los principales países recicladores de latas de aluminio y ayuda a comprender por qué estos envases tienen un ciclo de vida tan corto, pues al existir tasas de recuperación del 70% al 95% de las latas utilizadas, es más fácil generar “minas de residuos” en las ciudades, y con ello, su reutilización.

Proceso de reciclaje de aluminio

El aluminio, considerado un material con alto potencial de aprovechamiento, es recuperado habitualmente gracias a los planes de reciclaje post-consumo y post-industriales que implementan las ciudades. Sin embargo, para llevar estos residuos al mercado es necesario: (a) dar un tratamiento adecuado a las impurezas para cumplir los requerimientos de calidad de la industria (The Aluminum Association 2011); y (b) controlar su composición química para obtener las propiedades mecánicas deseadas en el producto (Brommer et al. 2010). Lo anterior es posible mediante la separación de los desechos por familia de materiales (polímeros, ferrosos, no ferrosos), la clasificación del aluminio por tipo de producto (lata, perfil, autoparte, papel) y

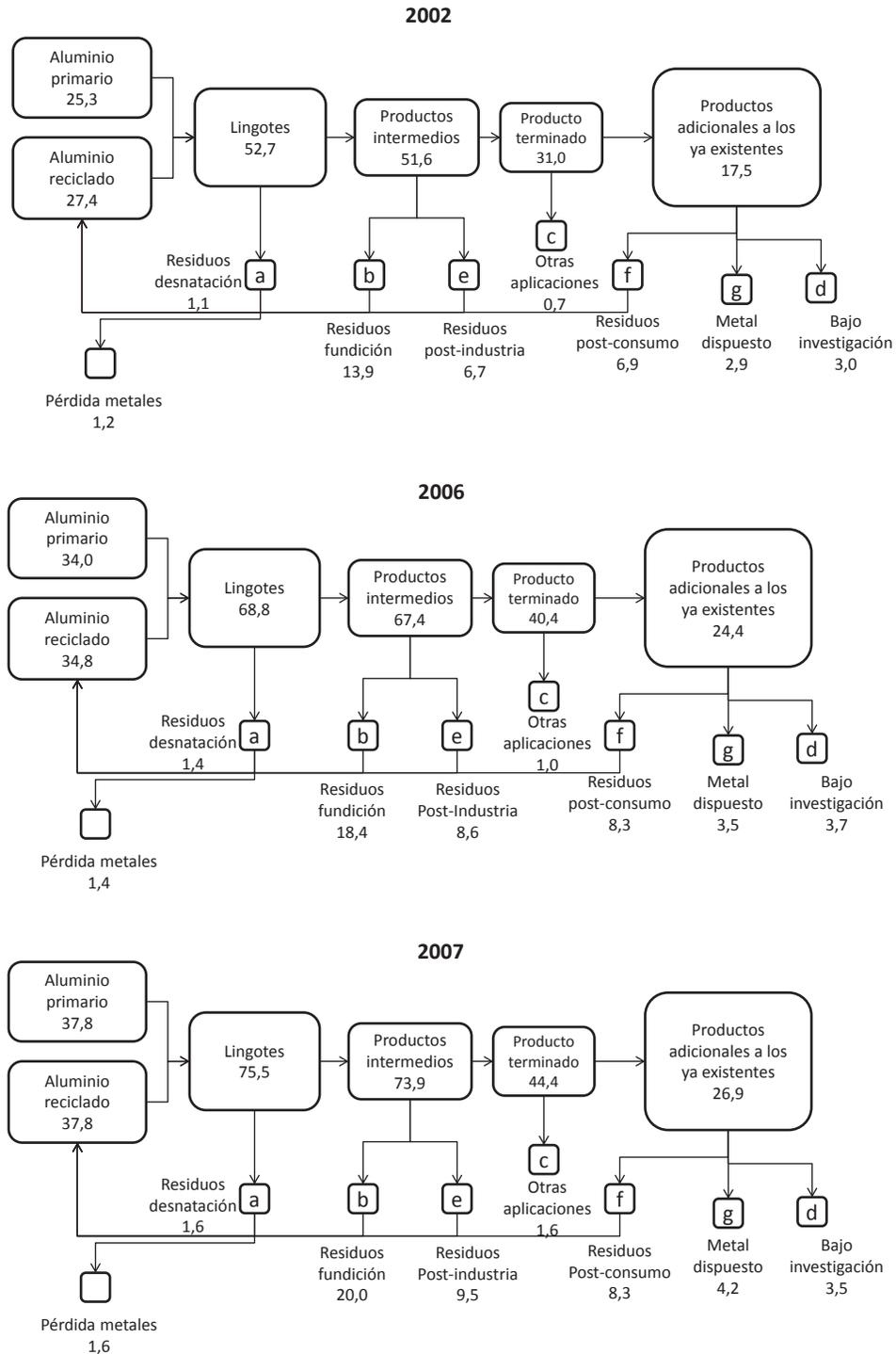


Figura 2. Flujo mundial del aluminio 2002, 2006 y 2007. a) aluminio desnataado; b) residuos de fundición, rollos y extrusión; c) aplicaciones del aluminio (de-ox, polvo); d) investigación sobre destino final del aluminio (recuperación, reciclaje o disposición); e) residuos de producto terminado; f) residuos consumo masivo; g) material dispuesto. Fuente: elaboración propia a partir de European Aluminum Association (2004), The Global Aluminum Recycling Committee (2006), Kamberović *et al.* (2009), Menzie *et al.* (2010), Dahmus (2014).

Tabla 3. Aplicaciones aluminio en Estados Unidos por sector industrial.

Sector	2005	2008	2009	2010
Transporte	40%	28%	28%	26%
Empaques	24%	22%	27%	24%
Construcción	17%	12%	12%	11%
Eléctrico/electrónico	7%	13%	13%	13%
Maquinaria	7%	7%	6%	6%
Otros	5%	18%	14%	20%

Fuente: elaboración propia a partir de Gaustad *et al.* (2010) y The Aluminum Association (2011).

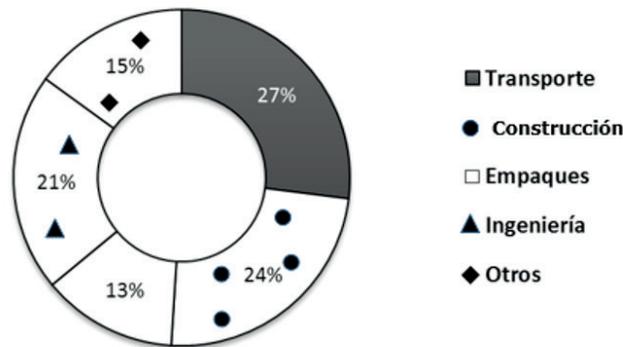


Figura 3. Aplicaciones del aluminio a nivel mundial por sector industrial (2007). Fuente: elaboración propia a partir de The Global Aluminum Recycling Committee (2006).

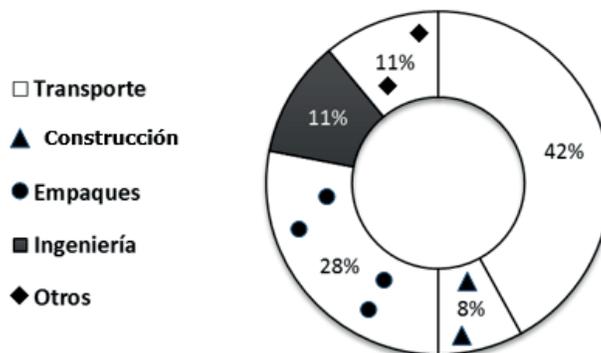


Figura 4. Fuentes generadoras de residuos de aluminio a nivel mundial por sector (2007). Fuente: elaboración propia a partir de The Global Aluminum Recycling Committee (2006).

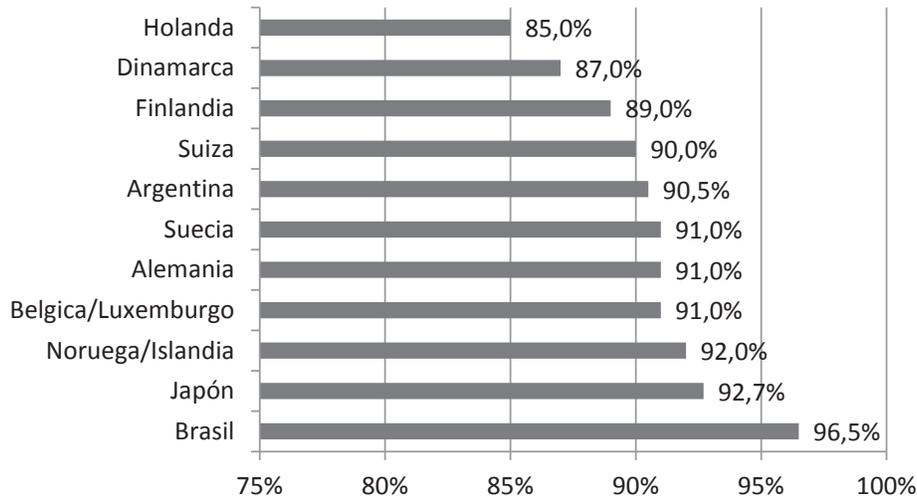


Figura 5. Tasas de recuperación de latas de aluminio a nivel mundial por país (2007).
Fuente: elaboración propia a partir de The Global Aluminum Recycling Committee (2006)

su fundición de manera independiente para evitar la mezcla de aleaciones. Estos procesos de conversión son críticos pues ayudan a remover elementos no deseados como el silicio, magnesio, níquel, zinc, hierro o cobre (Apelian 2009; Gaustad et al. 2012) en aleaciones de aluminio que no toleran su presencia ya que pueden modificar las características y propiedades del material.

Para clasificar el aluminio durante el reciclaje se debe tener en cuenta el tipo de aleación por el diferente grado de tolerancia a impurezas y el origen del residuo de acuerdo a la fuente generadora (Tabla 4). Los tipos de aleaciones son: (a) de moldeo, de fácil reutilización debido a su alta tolerancia a impurezas y cuya composición de Si es mayor al 5%; y (b) de forja, empleadas en estructuras críticas por su bajo contenido de Si (menor a 1%) y “endulzadas” con aluminio primario durante la fundición por su mayor dificultad de aprovechamiento (Reuter et al. 2005a; Das 2006b). En cuanto a su origen, se tienen los residuos post-consumo y post-industriales que se diferencian por su grado de limpieza (Gaustad 2009), siendo los desechos industriales los que tienen un menor grado de contaminación ya que su composición es casi idéntica a la del producto original (Reuter et al. 2005a).

Tabla 4. Residuos de aluminio según su origen y aleación.

		Aleaciones	
		Moldeo	Forja
Origen	Post-industrial	Viruta Residuos fundición Bandas	Papel foil Perfilería Cables Láminas
	Post-consumo	Motores Autopartes	Placas Envases Latas

Fuente: elaboración propia a partir de Reuter et al. (2005a)

Impacto ambiental y económico

La destrucción del suelo es uno de los impactos ambientales más evidentes de la producción de aluminio primario puesto que para llegar a las fuentes de bauxita se deben excavar 10 toneladas de rocas por cada tonelada de aluminio primario (Aizawa et al. 2002), lo que implica la deforestación de miles de hectáreas. La emisión de gases durante la transformación de la bauxita en alúmina y de ésta en aluminio es otro aspecto negativo pues en el proceso de fundición de aluminio reciclado se generan 304,51 kg de CO₂ por tonelada (Li et al. 2006), lo cual equivale a un 5% de las emisiones del procedimiento tradicional. La reutilización de

lodos rojos, subproducto del proceso de Bayer, aún es un reto para la industria, razón por la cual su almacenamiento y disposición deben ser cuidadosos. De no ser así, se corre el riesgo de contaminar las zonas circundantes a las plantas de producción de aluminio primario debido a su alto contenido de hierro (Reuter et al. 2005b), alta alcalinidad y contenido de metales pesados (The Aluminum Association 2011). En este aspecto el subproducto de la fundición de residuos de aluminio presenta una ventaja debido a su factible reutilización y a que su volumen es menor, pues mientras el proceso de Bayer genera 3,2 toneladas de barro color rojizo por cada tonelada de aluminio primario, durante la fabricación de aluminio reciclado se emplean 0,5 toneladas de fundentes que posteriormente pueden ser reciclados (Reuter et al. 2005b).

Desde el punto de vista económico, dos factores afectan la producción del aluminio primario: la eficiencia del proceso y la eficiencia energética. El primero está determinado por el consumo sostenible de la materia prima, el cual varía de la siguiente forma: la fabricación de 1 tonelada de aluminio primario consume 2 toneladas de alúmina, es decir, 4 toneladas de bauxita (Reuter et al. 2005a), en cambio

con 1.1 toneladas de residuos es posible conseguir la misma cantidad de aluminio secundario debido a que procesos de recuperación, como la fundición de residuos, tienen una eficiencia del 90% al 93% (Brommer et al. 2010; Dispinar et al. 2011; Hu et al. 2011; Ozer et al. 2013). En consecuencia, al haber un menor consumo de materia prima, disminuye el costo de producción para los productores de aluminio. Esta reducción también la perciben los fabricantes de piezas y/o productos con valor agregado gracias a la diferencia que existe entre el precio de la materia prima (lingotes, barras, láminas) de origen primario y secundario (Figura 6) (Frees 2008), la cual en 2003 fue de un 10%.

En cuanto al consumo de energía, la industria de aluminio primario es el séptimo mayor consumidor, al emplear 6.15×10^9 kWh/año, ubicándose por debajo de los sectores químico, maderero, petrolero, siderúrgico, alimentos y minería. El ahorro de energía es una de las principales características del proceso de transformación de los residuos en aluminio (Gaustad 2009; Birru et al. 2012) pues utiliza menos del 6% (Li et al. 2006) de la energía mencionada, lo que ayuda a reducir aún más el costo de producción de aluminio.

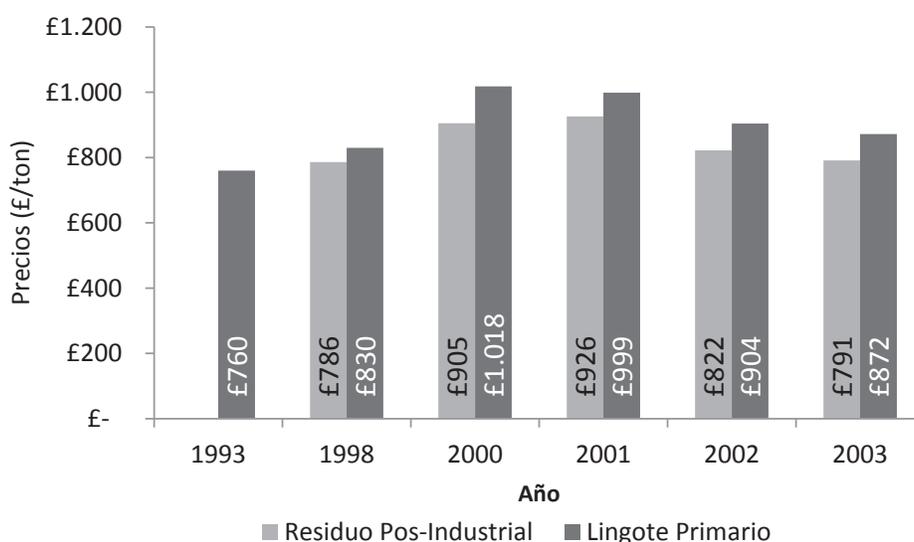


Figura 6. Precio aluminio primario vs secundario en países occidentales (\$£/ton). Fuente: elaboración propia a partir de Frees (2008).

La información descrita anteriormente es el resultado de la experiencia de diversos países en el reciclaje de aluminio. Con base en esto es posible concluir que más allá de ser una actividad amigable con el medio ambiente, el reciclaje de aluminio es una oportunidad de desarrollo económico y ambiental sostenible. Si esta actividad es una fuente alternativa de materia prima para aquellos países productores de aluminio que sí cuentan con yacimientos de bauxita, lo debería ser aún más para aquellos que no cuentan con este recurso y que se ven obligados a importar el aluminio y a depender de mercados externos (Das et al. 2007a). De esta forma, ante la creciente demanda por este material y el valor que ha adquirido en el mercado, es necesario considerar la posibilidad de generar fuentes propias de abastecimiento de aluminio y crear nuevos países productores.

En resumen, los beneficios de la producción de aluminio secundario para el cuidado del medio ambiente son reducir la explotación del suelo y el consumo de bauxita, la generación de residuos químicos y emisiones, el consumo de energía y la disposición de residuos en rellenos sanitarios. Respecto al desarrollo económico, los beneficios son disminuir la dependencia de mercados externos para el abastecimiento de aluminio, así como el costo de producción ante el menor consumo de energía y de materia prima.

Reciclaje en Bogotá

En el contexto de Bogotá, de las 6.500 toneladas de desperdicios que generan el sector doméstico e industrial diariamente, el 70% son considerados material aprovechable (Consejo de Bogotá 2011). Diversos estudios de caracterización de residuos han sido realizados por la Universidad de los Andes y la Alcaldía Mayor de Bogotá (2005), la Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos (UAESP) y la organización Compromiso Empresarial para el Reciclaje (CEMPRE), con el objetivo de identificar la proporción que hay entre los desechos plásticos, orgánicos, metálicos

y de vidrio en los sectores residencial, comercial y pequeños productores. Según la UAESP, en 2011, de las 2.350 ton/día de desechos residenciales que se generaron, el 0,85% eran residuos metálicos y el 0,14% aluminio (Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos 2011a, 2013), esto quiere decir que de las 2.350 toneladas, aproximadamente 3,29 toneladas de aluminio fueron enterradas bajo tierra. En el caso de los establecimientos comerciales la producción de residuos fue de 77 ton/día, de los cuales el 1,57% eran metales y el 0,27% aluminio (Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos 2011b, 2013), cifra inferior a la de los hogares pero superior a la que reportan los pequeños productores, quienes generaron de 560 kg/día de residuos, de los cuales el 0,87% eran metales y el 0,18% aluminio (Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos 2011c) (Tabla 5). De acuerdo a la información de la Tabla 5, y considerando la definición de los rellenos sanitarios como “minas de aluminio” o “bancos de energía” (Das et al. 2007b; Tillová et al. 2012b), se podría concluir que el sector metalúrgico y metalmecánico en Bogotá tienen la posibilidad de obtener subproductos y/o materias primas de estos rellenos sanitarios para sus procesos productivos, tal y como ocurre en la ciudad de Ensenada (Baja California, México) de acuerdo a estudios de Aguilar-Virgen y Vega (2010).

Tabla 5. Producción residuos sólidos por sector 2011.

Sector	ton/día	% composición	
	Total residuos	Residuos metálicos	Residuos aluminio
Residencial	2.350	0,85%	0,14%
Comercio	77	1,57%	0,27%
Pequeños productores	0,56	0,87%	0,18%

Fuente: elaboración propia a partir de Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos (2011a, 2011b, 2011c, 2013).

Según FUNDES (2010), la cadena de reciclaje en Bogotá está compuesta por: (1) las fuentes generadoras, es decir los hogares y empresas que generan los residuos sólidos; (2) los recuperadores, que incluyen a las empresas de aseos y recicladores de oficio; (3) los recolectores y transportadores integrados por estos mismos actores pero que adicionalmente cuentan con vehículos para movilizar la carga; (4) los acopiadores, que se dividen de acuerdo a su capacidad de almacenamiento y funciones ya que mientras los primarios tienen baja capacidad y solo comercializan, los secundarios pueden almacenar de 20 a 40 toneladas y realizan el proceso de clasificación y separación por familia de materiales; (5) los pre-transformadores, que se especializan en un material específico y compactan los residuos de acuerdo al tipo de producto; y por último (6) los transformadores que se encargan de fabricar productos terminados con valor agregado. Al comparar el precio de venta del aluminio en 2010 por parte los recicladores frente al de las bodegas y transformadores, se observa una diferencia del 40% y 165% respectivamente (Tabla 6), lo cual desfavorece significativamente a los primeros, ya que reciben la menor remuneración a pesar de realizar la labor más compleja del reciclaje.

Tabla 6. Precio de venta aluminio por eslabón de la cadena de reciclaje 2010 (\$/kg).

Reciclador	Bodega	Transformador
\$1.000	\$1.400	\$2.650

Fuente: elaboración propia a partir de Compromiso Empresarial para el reciclaje - CEMPRE (2011).

La transformación de residuos metálicos (sexto y último eslabón de la cadena de reciclaje) en Bogotá es una actividad realizada por un grupo reducido de compañías, las cuales son principalmente pequeñas fundidoras de carácter informal que emplean métodos empíricos de fundición con equipos artesanales de una antigüedad superior a los 20 años (Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA 2002). Esta situación es producto de la ausencia de

una hoja de ruta basada en la creación de proyectos sostenibles para el aprovechamiento de los residuos, de la escasa transferencia tecnológica que se genera en el sector, y de la falta de indicadores que ayuden a seguir y controlar las políticas públicas (FUNDES 2010). Trabajar con este tipo de maquinaria reduce la tasa de recuperación del aluminio en procesos como la fundición y exige mayor consumo de combustible (FUNDES 2010), mientras que el empirismo compromete la calidad del producto ante el desconocimiento de las variables que afectan el proceso (temperatura de fusión, tiempo del proceso, composición química del residuo, fundentes).

Si bien un factor negativo para el fortalecimiento del reciclaje es la informalidad de una parte de la industria metalúrgica, hay dos adicionales no menos importantes: (1) el consumo de aluminio reciclado por parte de la industria nacional es menor a la cantidad de material recuperado, por lo cual se eleva la tasa de exportación de estos residuos, ya que de acuerdo a cifras del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), de las 20.000 toneladas generadas en 2005, entre el 70% y el 80% fueron exportadas, mientras que en Colombia solo se consumieron 6.000 toneladas (Departamento Nacional de Planeación - DNP 2007).

Se observa que el país no ha explotado el potencial de aprovechamiento de los restos metálicos, lo cual es un indicio de la falta de desarrollo de la industria metalúrgica nacional y de las toneladas de aluminio secundario que están dejando de ser producidas en el país. Esta situación también es el reflejo del grado de estigmatización que la sociedad capitalina le ha dado al reciclaje al asociarlo al trabajo que deben realizar familias en la calle, quienes encuentran en la basura su medio de supervivencia, generando exclusión social de los recicladores de oficio (FUNDES 2010). Lo anterior evidencia la falta de claridad que existe en la ciudad sobre las bondades que trae la recuperación de aluminio y la importancia que tienen los recicladores como eslabones de la cadena de reciclaje, situación que ha sido aprovechada por países como Brasil, en donde gracias al reciclaje

de aluminio se ha logrado reducir el consumo de recursos naturales y energéticos (Dispinar et al. 2011), así como los niveles de importación de materia prima para sus procesos productivos. Esto demuestra que Brasil reconoce que la utilización, explotación, producción y disposición de aluminio primario tiene un impacto ambiental nocivo.

De cara al futuro, los países recicladores han comprendido la necesidad de alcanzar un desarrollo investigativo alrededor del aluminio secundario como el que tuvo el primario durante los últimos cien años (Sanders 2001), pues de esta forma es posible identificar nuevas aplicaciones y aleaciones que ayuden a fortalecer una de las industrias de metales más jóvenes del mundo (Boin y Bertram 2005). Aunque Bogotá presenta retrasos significativos en esta materia, esto no quiere decir que no pueda contribuir en este objetivo, pero para lograrlo hay que dar el primer paso desarrollando programas post-consumo y post-industriales voluntarios para crear conciencia del valor que tienen los residuos y de los beneficios que tiene su reaprovechamiento (Das 2007). Para esto es de vital importancia la participación activa del Estado, las empresas y la sociedad a través de políticas públicas que garanticen la reutilización del aluminio en nuevos ciclos productivos.

Conclusiones

La cadena de reciclaje de Bogotá cuenta con cuatro eslabones (recuperadores, recolectores y transportadores, acopiadores, pre-transformadores) que cumplen la misma función de intermediación, la cual consiste en acopiar y comercializar los residuos. La desventaja de este modelo es que al tener que transitar el aluminio por tantas bodegas, su precio de venta debe aumentar para dejar una utilidad a su respectivo propietario, lo cual encarece el precio del aluminio para el transformador y reduce el ingreso del reciclador de oficio. Si estos dos eslabones se integraran, podrían entregar el aluminio directamente, como ocurrió en Brasil, en donde fue posible regularizar el mercado de los residuos gracias a que los recicladores fueron concebidos como proveedores directos de la industria.

De acuerdo a los hallazgos de los estudios realizados por UAESP, Bogotá está enterrando y desaprovechando cerca de 3.5 ton/día de residuos de aluminio, los cuales son generados por el sector residencial, los pequeños productores y establecimientos comerciales. Como posibles causas de esta problemática está la ausencia de programas post-consumo y post-industriales que ayuden a incrementar la tasa de recuperación de aluminio, así como la falta de políticas públicas enfocadas en el desarrollo y fortalecimiento del reciclaje.

Ante la estigmatización que padecen los recicladores de oficio por la actividad que desarrollan en la cadena de reciclaje, es necesario resaltar ante la sociedad la importancia de su labor y acelerar su formalización en organizaciones de recicladores para que puedan convertirse en proveedores de la industria local. Si bien hay avances en este tema gracias a los programas desarrollados por CEMPRE y la UAESP, es necesario fortalecer este eslabón para reducir la intermediación y regularizar el mercado de los residuos, lo cual ayudaría a consolidar el reciclaje de aluminio.

Un parte de la industria metalúrgica de Bogotá, principalmente los pequeños fundidores, cuentan con un conocimiento empírico que les impide desarrollar procesos de fundición no artesanales, pues mientras en otros países los residuos se clasifican de acuerdo a la aleación y su origen para obtener un aluminio secundario similar al primario, en esta ciudad los residuos son mezclados para fabricar un producto sin controlar sus impurezas. Adicionalmente, debido al elevado costo de los equipos empleados para caracterizar las propiedades del aluminio, los pequeños fundidores presentan incertidumbre en cuanto a la aleación resultante y sus características. Por lo tanto, al no contar este sector con el conocimiento y la tecnología adecuada para realizar procesos de recuperación de aluminio, el volumen de residuos exportados de este metal superará la demanda interna.

Ante la importancia que ha adquirido el reciclaje de aluminio a nivel mundial, por ser considerada una actividad sostenible económica y ambientalmente,

se recomienda investigar y caracterizar el aluminio y sus aleaciones fabricadas en el país a partir de material reciclado y comparar los respectivos resultados con las normas técnicas establecidas para el aluminio. Esto con el objetivo de evaluar si las aplicaciones del aluminio secundario fabricado por los fundidores artesanales cumplen los requisitos de dichas normas.

Referencias

- Aguilar-Virgen, Q. y Armijo-de Vega, C. 2010. “Potencial de Recuperación de Residuos Sólidos Domésticos Dispuestos en un Relleno Sanitario”. *Revista de Ingeniería* 32: 16-27.
- Aizawa, T., Luangvaranunt, T. y Katsuyoshi, K. 2002. “Solid State Recycling of Recyclable Aluminum Wastes with in Process Microstructure Control”. *Materials Transactions* 43 (3): 315–21.
- Apelian, D. 2009. Aluminum Cast Alloys: Enabling Tools for Improved Performance. North American Die Casting Association (NADCA). Wheeling, Estados Unidos. Consultado el 3 de marzo de 2013. <http://www.foundry-planet.com/pl/sprzet/detail-view/4371/?cHash=0e16d6bce2a7a999f4984c5483a7ac0e>.
- Baeyens, J. y Dewil, R. 2010. “Recovery and Recycling of Post-Consumer Waste Materials”. *Chemical Engineering and Chemical Process Technology* 4: 148–58. Doi:10.1080/19397038.2010.498529.
- Birru, A.K., Karunakar, D.B. y Mahapatra, M.M. 2012. “Fluidity of A713 Cast Alloy with and without Scrap Addition Using Double Spiral Fluidity Test: A Comparison”. *World Academy of Science, Engineering and Technology* 61: 474–478.
- Boin, U.M.J. y Bertram, M. 2005. “Melting Standardized Aluminum Scrap: A Mass Balance Model for Europe”. *Journal of the Minerals, Metals and Materials Society* 57: 26–33.
- Brommer, T., Olivetti, E. y Kirchain, R. 2010. “Improving Aluminum Recycling through Investigations of Thermodynamic Effects in Remelting”. *Sustainable Systems and Technology* 33: 1–6.
- Chinchay, V.P. 2005. “Cadena Productiva Bauxita-Alúmina-Aluminio”. *Alternativa Financiera*: 82–91. Revista de la Facultad de Ciencias Contables, Económicas y Financieras, Universidad de San Martín de Porres, Lima, Perú.
- Compromiso Empresarial para el reciclaje - CEMPRE. 2011. Informe Condensado del Estudio Nacional de Reciclaje. Bogotá, Colombia. Consultado el 9 de febrero de 2015. http://www.cempre.org.co/sites/default/files/5674-estudio_nacional_de_reciclaje_informe_condensado_0.pdf.
- Consejo de Bogotá. 2011. Proyecto de Acuerdo 113 de 2011. Razones del Proyecto. Bogotá, Colombia. Consultado el 20 de enero de 2014. <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=41936>.
- Dahmus, J.B. 2014. “Can Efficiency Improvements Reduce Resource Consumption? A Historical Analysis of Ten Activities.” *Journal of Industrial Ecology* 18: 883–897.
- Das, S.K. 2006a. “Emerging Trends in Aluminum Recycling: Reasons and Responses”. *Light Metals*: 911–916.
- Das, S.K. 2006b. “Designing Aluminum Alloys for a Recycling Friendly World”. *Materials Science Forum*, 519–521. Doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.519-521.1239.
- Das, S.K. 2007. “Recent Projects of the Sloan Industry Center for a Sustainable Aluminum Industry Promoting Aluminum Recycling.” *Light Metals*: 1131–1140.

- Das, S.K., Green, J.A.S. y Kaufman, J.G. 2007a. "The Development of Recycle-Friendly Automotive Aluminum Alloys". *Journal of the Minerals, Metals and Materials Society* 59 (11): 47–51. Doi: 10.1007/s11837-007-0140-2.
- Das, S.K., Green, J.A.S. y Kaufman, J.G. 2007b. Application of the Recycling Indices to the Identification of Recycle Friendly Aluminum Alloys. Phinix Globally Responsible Resource Management. Lexington, Estados Unidos. Consultado el 1 de marzo de 2013. <http://www.phinix.net/services/Recycling/RecycleIndex.pdf>.
- Das, S.K., y Kaufman, J.G. 2008. "Recycling Aluminum Aerospace Alloys." *Advanced Materials and Processes* 166 (3): 34.
- Departamento Nacional de Planeación - DNP. 2007. Agenda Interna para la Productividad y la Competitividad. Documento Sectorial Metalmecánica y Siderurgia. Bogotá, Colombia. Consultado el 27 de mayo de 2012. <https://www.dropbox.com/s/xf7w2wxvbg6bzb/259.%20Agenda%20interna%20para%20la%20productividad%20y%20la%20competitividad.%20Documento%20sectorial%20metalmeccanica%20siderurgia.pdf?dl=0>.
- Dispinar, D., Kvithyld, A. y Nordmark, A. 2011. "Quality Assessment of Recycled Aluminum" *Light Metals*: 731–735.
- Echavarría, V.A. y Orrego, G.A. 2012. "Metalurgia Básica de Algunas Aleaciones de Aluminio Extruidas o Laminadas". *Revista Colombiana de Materiales* 2: 1–20.
- Ediz, C., y Savas, A.F. 2013. "Prediction the Effects of Used Material Groups on Alloy Components with Regression Analysis". *Advances in Applied Physics* 1 (2): 59–70.
- European Aluminum Association. 2004. Aluminum Recycling. The Road to High Quality Products. European Aluminum Association and Organisation of European Aluminum Refiners and Remelters. Bruselas, Bélgica. Consultado el 16 de febrero de 2013. <http://recycling.world-aluminium.org/uploads/media/f0000217.pdf>.
- Frees, N. 2008. "Crediting Aluminum recycling in LCA by Demand or by Disposal". *The International Journal of Life Cycle Assessment* 13 (3): 212–218.
- Frischknecht, R. 2010. "LCI Modelling Approaches Applied on Recycling of Materials in View of Environmental Sustainability, Risk Perception and Eco-Efficiency". *The International Journal of Life Cycle Assessment* 15: 666–667. Doi: 10.1007/s11367-010-0201-6.
- FUNDES. 2010. El Sector Reciclaje en Bogotá y su Región: Oportunidades para los Negocios Inclusivos. Bogotá, Colombia. Consultado el 13 de mayo de 2012. <http://www.fundes.org/asset/documents/569>.
- Gaustad, G. 2009. "Towards Sustainable Material Usage: Time Dependent Evaluation of Upgrading Technologies for Recycling". Tesis de Maestría en Ciencia de Materiales e Ingeniería. Departamento Ciencia de Materiales e Ingeniería. Instituto Tecnológico de Massachusetts, Cambridge (Estados Unidos). Consultado el 12 de marzo de 2013. http://msl.mit.edu/theses/Gaustad_G-thesis.pdf.
- Gaustad, G., Olivetti, E. y Kirchain, R. 2010. "Design for Recycling Evaluation and Efficient Alloy Modification". *Journal of Industrial Ecology* 14 (2): 286–308. Doi:10.1111/j.15309290.2010.00229.x.
- Gaustad, G., Olivetti, E. y Kirchain, R. 2012. "Improving Aluminum Recycling: A Survey of Sorting and Impurity Removal Technologies". *Resources, Conservation & Recycling* 58: 79–87. Doi:10.1016/j.resconrec.2011.10.010.
- Hong, J., Wang, J., Chen, H., Sun, B., Li, J. y Chen, C. 2010. "Process of Aluminum Dross Recycling and Life Cycle Assessment for

- Al-Si Alloys and Brown Fused Alumina”. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 6326 (9): 2155-2161. Doi: 10.1016/S1003-6326(09)60435-0.
- Hu, Y., Bakker, M.C.M. y Heij, P.G. 2011. “Recovery and Distribution of Incinerated Aluminum Packaging Waste”. *Waste Management* 31 (12): 2422-2430. Doi:10.1016/j.wasman.2011.07.021.
- International Aluminum Institute. 2014. Primary Aluminum Production – Industry Statistics. World Aluminum. Londres, Reino Unido. Consultado el 2 de febrero de 2015. <http://www.world-aluminium.org/statistics/>.
- Kamberović, Ž., Romhanji, E., Filipovi, M. y Korac, M. 2009. “The Recycling of High Magnesium Aluminum Alloys Estimation of the Most Reliable Procedure”. *Metallurgija* 15 (3): 189-200.
- Li, T., Hassan, M., Kuwana, K., Saito, K. y King, P. 2006. “Performance of Secondary Aluminum Melting Thermodynamic Analysis and Plant-Site Experiments”. *Energy* 31 (12): 1769-1779. Doi:10.1016/j.energy.2005.08.005.
- Li, Y. 2008. “Analytical Study and Cost Modeling of Secondary Aluminum Consumption for Alloy Producers under Uncertain Demands”. Tesis de Maestría en Ciencia de Materiales e Ingeniería. Departamento Ciencia de Materiales e Ingeniería. Instituto Tecnológico de Massachusetts, Cambridge (Estados Unidos). Consultado el 14 de febrero de 2013. http://msl.mit.edu/theses/Li_Y-thesis.pdf
- McMillan, C.A. 2011. “Modeling Temporal Aluminum Material Flows and Greenhouse Gas Emissions to Evaluate Metals Recycling Allocation in Life Cycle Assessment” Tesis Doctorado en Filosofía (Recursos Naturales y Ambiente). Universidad de Michigan, Ann Arbor (Estados Unidos). Consultado el 18 de febrero de 2013. <http://deepblue.lib.umich.edu/handle/2027.42/84593>.
- Menzie, W. D., Barry, J. J., Bleiwas, D.I., Bray, E.L., Goonan, T.G. y Matos, G. 2010. The Global Flow of Aluminum from 2006 through 2025. Science for a Changing World, 1-78. Virginia, Estados Unidos. Consultado el 24 de abril de 2013. <http://pubs.usgs.gov/of/2010/1256/pdf/ofr2010-1256..pdf>
- Nounezi, T. 2012. “Light Weight and High Strength Materials Made of Recycled Steel and Aluminum”. Tesis de Maestría en Ciencia Aplicada en Ingeniería Mecánica. Universidad de Ottawa, Ottawa (Canadá). Consultado el 1 de marzo de 2013. <https://www.ruor.uottawa.ca/en/handle/10393/20523>.
- Ozer, G., Yuksel, C., Comert, Z.Y. y Guler, K.A. 2013. “The Effects of Process Parameters on the Recycling Efficiency of Used Aluminium Beverage Cans”. *Materials Testing for Recycling Technologies* 55: 396-400.
- Polmear, I. J. 1996. “Recent Developments in Light Alloys”. *Materials Transactions* 37: 12-31.
- Reuter, M. A., Heiskanen, K., Boin, U., Schaik, A.V., Verhoef, E., Yang, Y. y Georgalli, G. 2005a. “Raw Materials for Aluminum Production”. En *The Metrics of Material and Metal Ecology Harmonizing the Resource, Technology and Environmental Cycles*, editado por B.A. Wills (16^{va} edición), 365-372. Hong Kong: Elsevier B.V.
- Reuter, M. A., Heiskanen, K., Boin, U., Schaik, A.V., Verhoef, E., Yang, Y. y Georgalli, G. 2005b. “Aluminum Metal Production”. En *The Metrics of Material and Metal Ecology Harmonizing the Resource, Technology and Environmental Cycles*, editado por B.A. Wills (16^{va} edición), 391-451. Hong Kong: Elsevier B.V.
- Rombach, G. 2013. “Raw Material Supply by Aluminum Recycling - Efficiency Evaluation and Long-Term Availability”. *Acta Materialia* 61: 1012-1020.

- Sanders, R. E. 2001. "Technology Innovation in Aluminum Products". *Journal of the Minerals, Metals and Materials Society* 53 (2): 21–25. Doi: 10.1007/s11837-001-0115-7.
- Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA. 2002. Caracterización Ocupacional del Sector Metalmeccánico. Mesa Sectorial Metalmeccánica. Bogotá, Colombia. Consultado el 2 de diciembre de 2013. <http://repositorio.sena.edu.co/bitstream/11404/2124/1/3039.pdf>.
- The Aluminum Association. 2011. Aluminum: The Element of Sustainability. Arlington, Estados Unidos. Consultado el 18 de febrero de 2013. http://www.aluminum.org/sites/default/files/Aluminum_The_Element_of_Sustainability.pdf.
- The Global Aluminum Recycling Committee. 2006. Global Aluminum Recycling. A Cornerstone of Sustainable Development. Düsseldorf, Alemania. Consultado el 24 de abril de 2013. http://www.world-aluminium.org/media/filer_public/2013/01/15/f0000181.pdf.
- Tillová, E., Chalupová, M., Duríníková, E. y Hortalova, L. 2012a. "Effect of Chemical Composition of Secondary Al-Si Cast Alloy on Intermetallic Phases". *Machines, Technologies, Materials* 6(9): 11–14.
- Tillová, E., Chalupová, M. y Hortalová, L. 2012b. "Evolution of Phases in a Recycled Al-Si Cast Alloy during Solution Treatment." En *Scanning Electron Microscopy*, editado por V. Kazmiruk, 411–438. InTech. Doi: 10.5772/1973. Consultado el 26 de enero de 2014. <http://www.intechopen.com/books/scanning-electron-microscopy/evolution-of-phases-in-a-recycled-al-si-cast-alloy-during-solution-treatment>.
- Torre, E., Guevara, A. y Yépez, S. 2009. "Influencia de Sales de Cloro y Flúor en el Reciclaje de Aluminio por Fusión". *Revista Politécnica* 30: 2–9.
- Tsakiridis, P.E. 2012. "Aluminum Salt Slag Characterization and Utilization - a Review". *Journal of Hazardous Materials* 217-218: 1–10. Doi:10.1016/j.jhazmat.2012.03.052.
- Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos - UAESP. 2011a. Caracterización de los residuos sólidos residenciales generados en la ciudad de Bogotá. Bogotá, Colombia. Consultado el 9 de febrero de 2015. [http://www.uaesp.gov.co/uaesp_jo/attachments/Caracterizaci%C3%B3n/RESIDENCIALES%2002-29-2012\(!\).pdf](http://www.uaesp.gov.co/uaesp_jo/attachments/Caracterizaci%C3%B3n/RESIDENCIALES%2002-29-2012(!).pdf)
- Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos - UAESP. 2011b. Caracterización de los residuos sólidos de establecimientos comerciales, pequeños productores generados en la ciudad de Bogotá. Bogotá, Colombia. Consultado el 9 de febrero de 2015. http://www.uaesp.gov.co/uaesp_jo/images/documentos/Caracterizacion/comercial_02-29-2012.pdf
- Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos - UAESP. 2011c. Caracterización de los residuos sólidos institucionales, pequeños productores generados en la ciudad de Bogotá. Bogotá, Colombia. Consultado el 9 de febrero de 2015. <http://comunidad.udistrital.edu.co/viverosepara/files/2013/07/caracterizacion-peque%C3%B1os-productores-intituciones-UAESP.pdf>.
- Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos - UAESP. 2013. Proyecto de Estudio del Plan Maestro para el Manejo Integral de Residuos Sólidos en Bogotá. Bogotá, Colombia. Consultado 31 de enero de 2015. http://www.uaesp.gov.co/uaesp_jo/images/SubdRBL/jica/GEJR13213_%20BOGOTA_INFORME1.pdf
- Universidad de los Andes y Alcaldía Mayor de Bogotá. 2005. *Estudio de caracterización y cuantificación de los materiales potencialmente reciclables presentes en los residuos sólidos municipales generados en Bogotá*. Bogotá: Unidad

- Ejecutiva de Servicios Públicos de la Alcaldía Mayor de Bogotá, Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental - CIIA, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes. Consultado el 14 de agosto de 2014. <https://www.dropbox.com/s/i4bib7tbvefmsji/192.%20Caracterizacion%20y%20cuantificacion%20residuos%20reciclables%20Bogot%C3%A1%202005.pdf?dl=0>.
- Valentim, A.R. y Kovaleski, J.L. 2010. Recovery of Aluminum Foil in the Induction Furnace. Challenges and Maturity of Production Engineering. Sao Pablo, Brasil. Consultado el 1 de marzo de 2013. http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2010_TI_ST_121_788_16146.pdf
- Verran, G.O. y Kurzawa, U. 2008. "An Experimental Study of Aluminum Can Recycling Using Fusion in Induction Furnace". *Resources, Conservation and Recycling* 52: 731-36. Doi:10.1016/j.resconrec.2007.10.001.
- White, G. 2012. Low Recycling Rates of Used Aluminum Cans in America: Ethics and Education. Pittsburgh, Estados Unidos. Consultado el 6 de febrero de 2013. <http://www.pitt.edu/~gjw14/ENGR3.docx>.

Citar este artículo como:

Millán, F., Sánchez, D. y Olaya, J. 2015. "Reciclaje de aluminio: oportunidades de desarrollo en Bogotá (Colombia)". *Gestión y Ambiente* 18(2): 135-152.