

04-042

ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF THE USE OF STEEL SLAG IN SHOT BLASTING BY LCA.

Díaz Piloñeta, Marina ⁽¹⁾; Terrados Cristos, Marta ⁽¹⁾; Alonso Iglesias, Guillermo ⁽²⁾; Álvarez Cabal, José Valeriano ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Universidad de Oviedo, ⁽²⁾ Universidad de Oviedo

Worldwide, approximately 400 million slags are generated annually. Specifically, for every tonne of steel, around 400 kg of BF/BOF slag is produced. This slag is currently accumulated with hardly any type of recovery, so it is necessary to look for alternatives for its use. Surface blasting has many applications, but the environmental problems associated with conventional abrasives, mainly silica sand, lead to a low number of research works developed in this field. In this way, the present work analyses the use of iron and steel waste as abrasives by a comparative Life Cycle Analysis from cradle to gate. Therefore, this waste is presented as an environmentally friendly alternative that contributes to reducing the overall impact of both the iron and steel industry and blasting, minimising the need for the extraction of natural aggregates.

Keywords: Shot blasting; slag; Life Cycle Assessment.

VALORACIÓN AMBIENTAL DE LA APLICACIÓN DE RESIDUOS SIDERÚRGICOS EN GRANALLADO.

A nivel mundial, se generan anualmente aproximadamente 400 millones de escorias. Concretamente, por cada tonelada de acero, se producen unos 400 kg de escorias BF/BOF, que actualmente se acumulan sin apenas ningún tipo de valorización, por lo que es necesario buscar alternativas para su utilización. El chorreado superficial tiene muchas aplicaciones, pero los problemas ambientales asociados a los abrasivos convencionales, principalmente la arena de sílice, conllevan un bajo número de trabajos de investigación desarrollados en este campo. En esta vía, el presente trabajo analiza la utilización de residuos siderúrgicos como abrasivos mediante un Análisis de Ciclo de Vida comparativo entre la arena de sílice y la escoria siderúrgica, con un enfoque de la cuna a la puerta. Así, se plantea estos residuos como una alternativa respetuosa con el medio ambiente que contribuye a reducir el impacto global, tanto de la industria siderúrgica como del chorreado, minimizando la necesidad de extracción de áridos naturales.

Palabras claves: Granallado; escoria; Análisis de ciclo de Vida

Correspondencia: Marina Díaz Piloñeta diazmarina@uniovi.es



1. Introducción

El sistema económico vigente se encuentra obsoleto ante los avances de una sociedad que cada vez desarrolla una mayor conciencia y sensibilidad ante los problemas medioambientales. El aumento del consumo y de la consiguiente producción industrial ha llevado a una rápida disminución de los recursos naturales disponibles y, de manera simultánea, a un elevado volumen de producción de residuos (Ellen MacArthur Foundation y McKinsey 2016). Teniendo en cuenta que los recursos son finitos, el actual modelo económico, basado en la disposición de grandes cantidades de energía y recursos, está alcanzando ya sus límites físicos. Debido a ello y como respuesta al problema, el cambio hacia un modelo circular se ha convertido en una necesidad. El modelo de producción lineal basado en “tomar-fabricar-consumir-eliminar” es agresivo con el medio y las estimaciones actuales muestran cómo siguiendo con este sistema no tardarán en agotarse las fuentes de suministro, tanto materiales como energéticas (Korhonen, Honkasalo, y Seppälä 2018). Además, tiene una fuerte dependencia de las materias primas, lo que conlleva un riesgo asociado al suministro, precios elevados y con mucha volatilidad, así como una reducción significativa del capital natural, además de las consiguientes pérdidas económicas.

La economía circular se define como reparadora y regenerativa, y pretende desvincular el crecimiento económico del consumo finito de recursos (Ellen MacArthur Foundation 2013). Se trata de implementar una nueva economía basada en el principio de “cerrar el ciclo de vida” de los productos: los residuos de unos se convierten en recursos para otros. Así, se extraen nuevas materias primas, se fabrican productos y de los residuos generados se recuperan materiales y sustancias que posteriormente se reincorporan de nuevo al ciclo productivo. Desde el punto de vista medioambiental, jurídico y social e incluso económico, resulta esencial realizar un esfuerzo adicional para llevar a cabo la recuperación de los residuos producidos y conseguir una reducción significativa de aquellos que sean enviados a vertedero.

Específicamente, la industria siderúrgica, como industria primaria masiva, genera, de manera inherente al proceso productivo, una gran cantidad de residuos. Estos residuos se producen en diferentes escenarios de la cadena productiva, pero destacan por su gran volumen de generación (90%) las escorias (Worldsteel Association 2018). Se trata de materiales sólidos que, a nivel mundial, representan más de 400 millones de toneladas al año (Worldsteel Association 2018).

Las escorias son residuos sólidos compuestos principalmente de sílice, óxido de calcio, óxido de magnesio y óxidos de aluminio y hierro. Aunque en el proceso se generan tres tipos principales (escoria de horno alto o BF, escoria BOF o LD generada en el convertidor de acero mediante el proceso de Linz-Donawitz y escoria EAF de horno de arco eléctrico), el mayor problema de almacenamiento está asociado a la BOF. De media, por cada tonelada de acero se producen aproximadamente 130 kg de esta escoria que generalmente es almacenada en el vertedero sin apenas ningún tipo de valorización. Si bien las otras dos tipologías han tenido salida en varios sectores y llevan siendo reutilizadas desde hace años, la escoria BOF se reaprovecha en cantidades mínimas.

Las principales aplicaciones relacionadas con este material tienen su foco en el campo de la construcción y la ingeniería civil, como árido para la fabricación de hormigón y cemento, o en carreteras (Naidu, Sheridan, y van Dyk 2020). Sin embargo, varios estudios demuestran como la presencia de cal libre y magnesia en su composición química comprometen la estabilidad de las estructuras y construcciones en las que se emplea esta escoria si ésta no es debidamente estabilizada con anterioridad (Gautier et al. 2013). Además, la presencia de fósforo limita también su reutilización a nivel interno. Por lo tanto, la salida del material es mínima, pero su generación es masiva. Por cada tonelada de acero producido se generan

aproximadamente 130 kg de esta escoria (Worldsteel Association 2018) que actualmente se almacenan en vertedero sin apenas ningún tipo de valorización.

Dados los altos volúmenes tratados, en la búsqueda de soluciones es preciso incidir en aquellas que puedan realmente ayudar a resolver el problema, por lo que se requieren aplicaciones que cubran los elevados porcentajes de generación. Aun excluyendo las labores de construcción, el campo de la ingeniería civil es el que mayor cantidad de áridos y material consume, por lo que resulta un candidato idóneo para la introducción de los métodos de economía circular. La preparación de las superficies de acero, hormigón, y otros materiales estructurales, es una tarea vital en muchas aplicaciones de ingeniería, cuyo propósito principal es proteger la superficie contra la degradación de la corrosión, la fatiga y el desgaste (Draganovská et al. 2018). Para ello, las superficies se recubren de algún tipo de material protector, ya sea pintura, metales de sacrificio u otros elementos pero, para conseguir una verdadera cohesión entre las superficies y el recubrimiento, es necesario prepararlas eliminando todo resto de suciedad o corrosión y proporcionándole una rugosidad adecuada (P. Mailvaganam, B. Pye, y R. Arnott 1998). El método más utilizado para ello es el chorreado superficial, que consiste en propulsar una corriente de material abrasivo disperso en un medio (líquido o gas) contra una superficie a alta presión (Dudek 2018). Mediante la fuerza del impacto se eliminan los contaminantes superficiales como establece la norma ISO 12944-4, cuyo objetivo fundamental es producir una superficie limpia y libre de todo tipo de suciedad.

Los abrasivos son materiales caracterizados por su alta dureza y capacidad de corte, La mayoría de ellos tienen origen mineral y son obtenidos directamente de la naturaleza, mientras que otros se obtienen por procesos químicos. Actualmente el abrasivo más utilizado es la arena de sílice o granalla metálica, lo que requiere la producción de material y consumo de recursos, además de diferentes problemas para la salud (Radnoff y Kutz 2014). Sin embargo, la escoria puede mejorar la sostenibilidad de las operaciones si se consigue reemplazar estos áridos de nueva producción por escoria residual ya almacenada. La viabilidad técnica de la utilización de esta escoria ya ha sido estudiada en otros trabajos (Piloñeta et al. 2020) en los que se comparó el rendimiento de la escoria BOF como abrasivo con la escoria BF, cuya utilización ya viene contemplada en la norma (ISO 8504-2 2002) como abrasivo metálico no sintético. Los resultados mostraron como la escoria BOF obtuvo un nivel de limpieza de la superficie similar al de la escoria BF, sin embargo, no se aportaron conclusiones sobre la ganancia ambiental que supone el empleo de esta escoria en lugar de otros abrasivos tradicionales, como la arena de sílice.

El objetivo principal de este trabajo es el diseño de nuevas aplicaciones que permitan valorizar escorias dentro del ciclo de suministro de materias primas de modo que, en consonancia con los criterios de economía circular, el material sea aprovechado en aplicaciones relevantes en otros sectores. Específicamente se trata de estudiar la ganancia ambiental derivada del uso de la escoria BOF como abrasivo mediante Análisis de Ciclo de Vida demostrando que la utilización de residuos industriales como abrasivos es una alternativa respetuosa con el medio ambiente que contribuye a reducir el impacto global tanto de la industria siderúrgica como del chorreado, minimizando la necesidad de extraer áridos naturales.

2. Metodología

La metodología aplicada para analizar los impactos ambientales derivados de sustituir un abrasivo tradicional, como es la arena de sílice, por un residuo siderúrgico sin carga ambiental, ha sido la de Análisis de Ciclo de Vida (ACV o LCA por sus siglas en inglés). Es una técnica analítica utilizada para evaluar los impactos ambientales y recursos asociados a un producto, servicio o sistema (Curran 2013). Ha sido normalizada por la Organización Internacional de Normalización, ISO 14040 (Organización Internacional de Normalización 2006), y la Comisión

Europea emitió unas directrices que detallan las normas de una metodología de LCA recomendada (European Commission 2010).

La evaluación ambiental realizada bajo LCA cubre una amplia gama de impactos ambientales relacionados con las emisiones (por ejemplo, cambio climático, acidificación, oxidantes fotoquímicos, ecotoxicidad) o intervenciones físicas (por ejemplo, uso de la tierra, extracción y uso de agua, ruido) e impactos sobre los recursos relacionados con la uso y pérdida de recursos abióticos y bióticos.

Esta técnica resulta la herramienta idónea para realizar un análisis comparativo de los impactos ambientales producidos al trabajar con arena sílice como abrasivo en las labores de chorreado, o con escoria de acería. El análisis se realizó en base a los resultados obtenidos en un estudio real en el que se evaluó en un entorno controlado la utilización de la escoria como abrasivo (Piloñeta et al. 2020). La metodología seguida para el análisis se basa en las recomendaciones de la norma ISO 14040, en la que se establecen cuatro fases principales (Figura 1).

Figura 1. Principales fases en el Análisis de Ciclo de Vida.



En la primera fase se definieron los objetivos y la evaluación a realizar que proporciona los límites del sistema, el marco de modelado aplicado y los impactos ambientales cubiertos. La función que proporciona el sistema se especifica de forma cuantitativa mediante la definición de la unidad funcional, que es la base para determinar los flujos de referencia del análisis. El análisis de inventario es la siguiente etapa, donde se identificaron los procesos que se incluyen en el sistema analizado y se recopilaban los datos para cada uno de estos procesos en forma de entradas de recursos, energía, materiales o productos, y salidas de productos, emisiones o residuos.

La fase de evaluación de impacto traduce las entradas del inventario en contribuciones a todos los impactos ambientales cubiertos por el LCA. La evaluación se centró en indicadores elegidos en algún lugar a lo largo de la ruta de impacto (*mid point*) y también en los impactos

en las áreas de protección del LCA (*end point*): salud humana, medio ambiente natural o recursos naturales (Hauschild et al. 2012).

3. Análisis de Ciclo de Vida

3.1 Definición de objetivos y alcance

El objetivo principal de este estudio es conocer la ganancia ambiental derivada de la sustitución parcial de una materia prima con elevada carga ambiental por un residuo de carga ambiental cero. Para ello se compararán dos escenarios, uno utilizando la arena de sílice como abrasivo convencional más utilizado actualmente y otro dónde se sustituye completamente por escoria BOF.

La razón principal de la realización de este estudio es la búsqueda de una solución a la problemática derivada de la acumulación de estos residuos en vertederos. Además, existen otros objetivos secundarios de especial interés:

- Apoyar el uso de materiales reciclados como una forma de mejorar la sostenibilidad ambiental de las labores de chorreado superficial.
- Potenciar la economía circular, evitando un residuo que será reintroducido como subproducto.
- Evitar las emisiones derivadas de la extracción de recursos y evitar el agotamiento de los mismos.

En este caso, se estudiará el impacto ambiental derivado de limpiar 1 m² de superficie hasta un nivel estándar de rugosidad, por tanto, esta es considerada la unidad funcional. En cuanto a las limitaciones del sistema, cada escenario se ha analizado desde la extracción de la materia prima hasta su uso en la limpieza final, de acuerdo con el enfoque conocido como de la cuna a la puerta. Además, se han establecido una serie de limitaciones y suposiciones:

- No se consideran etapas posteriores al uso final como abrasivo, dado que no se tendrían datos que permitan validar estas premisas.
- Se han excluido aquellos elementos con influencias muy bajas en el impacto ambiental.
- No se considera el impacto ambiental derivado del transporte de materiales procesados, para permitir que los resultados puedan ser extrapolables.
- La etapa de utilización final es idéntica en ambos escenarios por lo que carece de sentido sumarla en la comparación.
- Los resultados obtenidos tendrán un carácter no generalista ya que están directamente condicionados por las hipótesis y las limitaciones planteadas.
- Dado que el mismo producto se produce en diferentes localizaciones conectadas globalmente, se utilizan los datos generados de mercado.

3.2 Inventario Ambiental

Para poder simular el producto a través de sus entradas y salidas, se define el sistema del que se obtendrán los datos, en función de su unidad funcional. Los diagramas de flujo para

ambos escenarios se presentan en la Figura 2. En ambos casos los datos necesarios para categorizar los procesos fueron extraídos de la base de datos Ecoinvent.

El diagrama superior muestra el escenario 1 o escenario base, que incluye el proceso de chorreado superficial con arena de sílice. El esquema incluye los costes ambientales de la extracción de los recursos, y una primera etapa de distribución. Posteriormente se incluye una etapa de tratamiento, en la que se tienen en cuenta los procesos de secado, molienda, tamizado y empaquetado de la arena para posteriormente ser transportada hasta lugar de utilización.

Figura 2. Límites del sistema para ambos escenarios.



Por otro lado, en el diagrama inferior se representa el escenario 2 que tendría lugar sustituyendo la arena de sílice por un residuo como es la escoria BOF. En este caso se observa como se evitan todas las fases relativas a la extracción y transporte inicial, al tratarse de un residuo proveniente de otra industria. En la fase de tratamiento se incluyen los procesos de cribado y molienda que al ser procesos menores se considera se realizan en origen. Las últimas etapas consideradas son las mismas que para el escenario anterior, donde se tiene en cuenta el transporte hasta el sitio de aplicación.

3.3 Evaluación del Impacto

Se evaluaron los efectos medioambientales de los datos recogidos en la etapa de inventario ambiental. Existen diferentes métodos de evaluación, y cada uno tiene en cuenta diferentes indicadores y/o factores. En este caso, se utilizó ReCiPe. ReCiPe es el sucesor de los métodos Eco-indicator 99 y CML-IA. El propósito al comienzo del desarrollo era integrar el 'enfoque orientado al problema' de CML-IA y el 'enfoque orientado al daño' del Eco-indicador 99. ReCiPe implementa ambas estrategias y tiene tanto el punto medio (orientado al problema) como las categorías de impacto del punto final (orientadas al daño). Los factores de caracterización del punto medio se multiplican por factores de daño, para obtener los valores de caracterización del punto final.

4. Resultados y discusión

Se procede a analizar los resultados obtenidos en este proyecto de mejora de la sostenibilidad ambiental. Primero se analizará la ganancia ambiental al comparar los dos escenarios,

considerando el residuo introducido con carga ambiental nula. El conjunto de datos representa el impacto ambiental en las diferentes categorías para la producción de arena de sílice obtenida mediante secado, ya que este fue el procedimiento en los ensayos a escala industrial. La arena de sílice es una arena especial con un contenido de SiO₂ (cuarzo) superior al 85% (p/p).

Las actividades incluidas van desde la extracción, recepción de la arena, procesamiento y secado del material, dando como resultado arena de sílice. Sólo se incluye la demanda de energía, no se tiene en cuenta la infraestructura. No se incluyen las necesidades de la administración.

En la Tabla 1 aparecen los resultados de la evaluación por categorías de impacto mientras que en la Figura 3 se representan los resultados normalizados para poder realizar una comparación de los mismos.

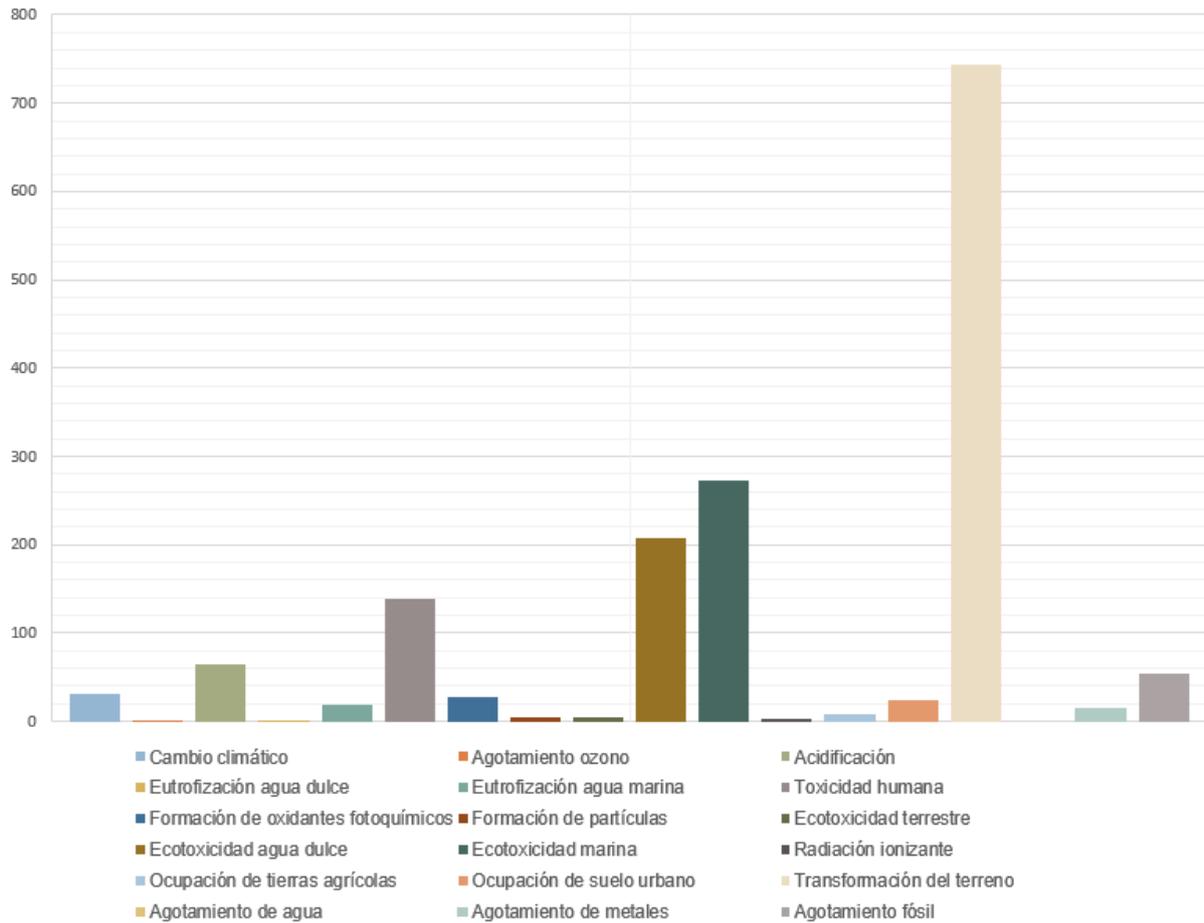
Tabla 1. Resultados del análisis de impacto por categoría de impacto ReCiPe midpoint.

Categoría de impacto	Unidad	Total
Cambio climático ecosistemas	Especies/año	2,70x10 ⁻¹⁰
Agotamiento ozono	DALY	6,60x10 ⁻¹²
Eutrofización agua dulce	Especies/año	3,43x10 ⁻¹³
Cambio climático salud humana	DALY	4,77x10 ⁻⁰⁸
Acidificación terrestre	Especies/año	1,29x10 ⁻¹²
Toxicidad humana	DALY	6,07x10 ⁻⁰⁹
Formación de oxidantes fotoquímicos	DALY	6,03x10 ⁻¹²
Formación de partículas	DALY	2,08x10 ⁻⁰⁸
Ecotoxicidad terrestre	Especies/año	6,08x10 ⁻¹³
Ecotoxicidad agua dulce	Especies/año	1,97x10 ⁻¹³
Ecotoxicidad marina	Especies/año	4,17x10 ⁻¹⁴
Radiación ionizante	DALY	3,07x10 ⁻¹¹
Ocupación de tierras agrícolas	Especies/año	4,39x10 ⁻¹¹
Ocupación de suelo urbano	Especies/año	2,07x10 ⁻¹¹
Transformación del terreno	Especies/año	2,16x10 ⁻¹¹
Agotamiento de metales	\$	7,42x10 ⁻⁰⁵
Agotamiento fósil	\$	0,000139

La principal categoría de impacto midpoint que se ve afectada con diferencia, una vez normalizadas para poder comparar es la transformación del terreno. Los resultados del ACV muestran que, para la obtención de la arena de sílice necesaria para este fin, existen múltiples subprocesos involucrados, que incluye todas las actividades de excavación, transporte, uso de maquinaria, infraestructura de operaciones, procesado, etc. Sin embargo, también llama la atención los impactos derivados de otras categorías, como por ejemplo la ecotoxicidad de las diferentes masas de agua consideradas, tanto agua dulce como marina o el impacto sobre la

toxicidad humana que, si bien no llegan a los niveles de la transformación del terreno, también obtienen valores significativos.

Figura 3. Resultados del análisis de impacto por categoría de impacto ReCiPe midpoint normalizado.



Del mismo modo, resulta interesante identificar el peso derivado de cada categoría de daño midpoint en los impactos endpoint (salud humana, ecosistemas, recursos) tal y como aparece detallado en las figuras siguientes.

Figura 4. Impacto de cada una de las categorías *midpoint* en la categoría *endpoint* “salud humana”.

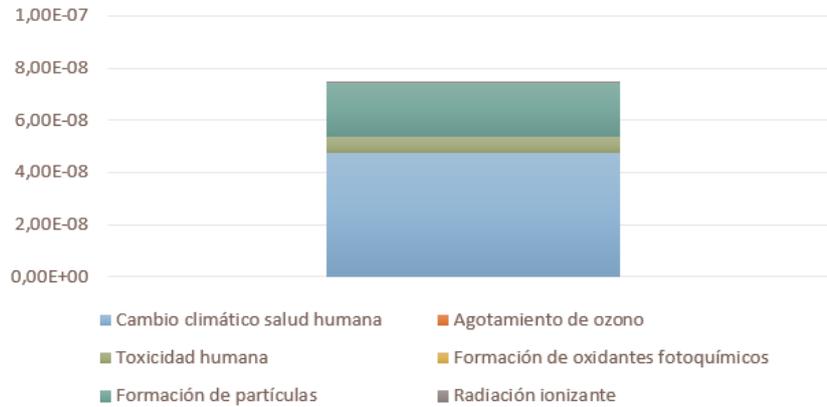


Figura 5. Impacto de cada una de las categorías *midpoint* en la categoría *endpoint* “ecosistemas”.

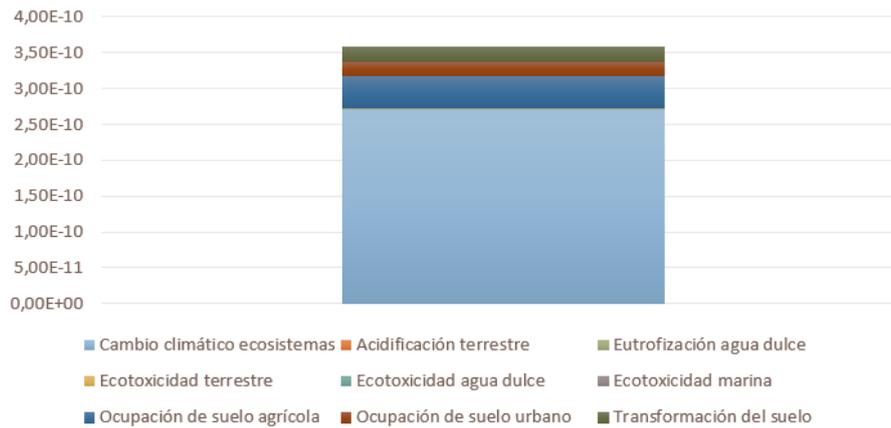
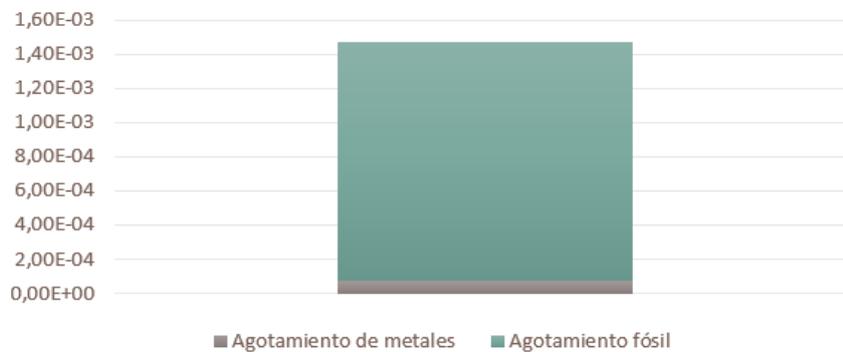


Figura 6. Impacto de cada una de las categorías *midpoint* en la categoría *endpoint* “recursos”.



Como se puede apreciar, dentro de los impactos derivados en la salud humana (Figura 4), las categorías más reseñables son la toxicidad humana, la formación de partículas, y, sobre todo, el cambio climático. Esta categoría también es la más importante analizado los impactos sobre los ecosistemas (Figura 5), aunque también destacan otros como la ocupación del suelo. Sin

embargo, la utilización de la arena de sílice como abrasivo en lugar de la escoria BOF con impacto cero, tiene sus mayores efectos sobre la categoría de “recursos” (Tabla 2) y concretamente sobre el agotamiento de los combustibles fósiles, tal y como aparece reflejado en la Figura 6.

Tabla 2. Resultados finales de la evaluación por categorías de daño, ReCipE endpoint (H).

Categoría de impacto	Unidad	Total
Salud humana	DALY	7,46x10 ⁻⁸
Ecosistemas	Especies/año	3,59x10 ⁻¹⁰
Recursos	\$	0,0001467

4 Conclusiones

En el presente trabajo se ha evaluado la ganancia ambiental derivada de sustituir la arena de sílice, abrasivo tradicional empleado en tareas de chorreado superficial, por escorias BOF, un residuo industrial técnicamente viable para su uso como abrasivo, a través de un Análisis de Ciclo de Vida. Se han obtenido las siguientes conclusiones:

- Los principales impactos derivados de la utilización de la arena de sílice como abrasivo están relacionados con las tareas de extracción de material y posterior secado de la arena.
- Analizando los impactos por categorías y comparándolos se puede observar cómo las categorías más afectadas son la transformación del terreno y la ecotoxicidad de las masas de agua (agua dulce y agua marina).
- Finalmente, de los resultados obtenidos atendiendo a las tres categorías de daño *endpoint*, el más importante es el impacto en los recursos.

La escoria BOF, por tanto, resulta una alternativa más respetuosa con el medio ambiente, contribuye a reducir el impacto ambiental ya que disminuye la necesidad de extraer áridos naturales y maximiza el uso de los recursos disponibles que potencian la economía circular.

5 Referencias

- Curran, M. A. (2013). Life Cycle Assessment: A Review of the Methodology and Its Application to Sustainability. *Current Opinion in Chemical Engineering* 2(3), 273-77.
- Draganovská, D., Ižaríková, G., Guzanová, A., & Brezinová, J. (2018). General Regression Model for Predicting Surface Topography after Abrasive Blasting. *Metals* 8(11), 938.
- Dudek, D. 2018. Comparative research on abrasive blasting of 145Cr6 steel for various working media. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 461.
- Ellen MacArthur Foundation. (2013). *Towards the circular economy*. Obtenido el 10 de marzo de 2021:
<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Ellen-MacArthur-Foundation-Towards-the-Circular-Economy-vol.1.pdf>.

- Ellen MacArthur Foundation & McKinsey. (2016). *Growth within: a circular economy vision for a competitive Europe*. Obtenido el 10 de marzo de 2021: <https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/growth-within-a-circular-economy-vision-for-a-competitive-europe>
- European Commission. (2010). *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General Guide for Life Cycle Assessment - Provisions and Action Steps*. Luxemburgo. Obtenido el 9 de abril de 2021: <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/international-reference-life-cycle-data-system-ilcd-handbook-general-guide-life-cycle>.
- Gautier, M., Poirier, J., Bodéan, F., Franceschini, G., & Verón, E. (2013). Basic Oxygen Furnace (BOF) Slag Cooling: Laboratory Characteristics and Prediction Calculations. *International Journal of Mineral Processing* 123, 94-101.
- Hauschild, M., Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., Jolliet, O., Margni, M., Schryver, A. D., Humbert, S., Laurent, A., Sala, S., & Pant, R. (2012). Identifying best existing practice for characterization modeling in life cycle impact assessment». *International Journal of Life Cycle Assessment* 18, 683-697.
- Korhonen, J., Honkasalo, A., & Seppälä, J. (2018). Circular Economy: The Concept and Its Limitations. *Ecological Economics* 143, 37-46.
- Mailvaganam, N. P., Pye, G. B., & Arnott, M. R. (1998). Surface Preparation of the Concrete Substrate. *Institute for Research in Construction* 24.
- Naidu, T. S., Sheridan, C. M., & van Dyk, L. D. (2020). Basic Oxygen Furnace Slag: Review of Current and Potential Uses. *Minerals Engineering* 149.
- Organización Internacional de Normalización. (2006). ISO 14044: *Gestión medioambiental - Evaluación del ciclo de vida - Requisitos y directrices*.
- Organización Internacional de Normalización. (2002). ISO 8504-2: Preparación de Sustratos de Acero Previa a La Aplicación de Pinturas y Productos Relacionados. Métodos de Preparación de Las Superficies. Parte 2: Limpieza Por Chorreado Abrasivo
- Piloñeta, M. D., Ortega, F., Mesa, J. M., & Moran, H. (2020). Evaluación de la utilización de escorias siderúrgicas BOF para la preparación superficial de materiales por abrasión. *DYNA* 95(2), 158-62.
- Radnoff, D. L., & Kutz, M. K. (2014). Exposure to Crystalline Silica in Abrasive Blasting Operations Where Silica and Non-Silica Abrasives Are Used. *The Annals of Occupational Hygiene* 58(1), 19-27.
- Worldsteel Association. (2018). *Fact Sheet. Steel Industry Co-Products*. Obtenido el 5 de marzo de 2021: <https://www.worldsteel.org/publications/position-papers/co-product-position-paper.html>.

Comunicación alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible



Se solicita a los autores que después de las referencias incluyan este apartado e indiquen un mínimo de 1 y un máximo de 2 Objetivos de Desarrollo Sostenible a los que su comunicación contribuye o con los que está más alineado.

Copie el icono de los Objetivos seleccionados y péguelo ajustado al tamaño que se indica en la plantilla. Puede encontrar los iconos y consultar una descripción más detallada de cada objetivo en el siguiente enlace: [Sustainable Development Goals](#)