

# Variabilidad en los impactos ambientales de la producción de acero según una muestra de declaraciones ambientales de producto

## Variability in environmental impacts of steel production based on a sample of environmental product declarations

*Arlenne Sanchez<sup>1,2</sup>, Leyza Henández,<sup>1,2</sup> Emanuel Elcock,<sup>1</sup> Yazmin L. Mack-Vergara<sup>1,2,3,\*</sup>*

<sup>1</sup>Universidad Tecnológica de Panamá, Facultad de Ingeniería Civil, Panamá

<sup>2</sup>Universidad Tecnológica de Panamá, Centro Experimental de Ingeniería, Grupo de Investigación Sustainable Construction UTP, Panamá

<sup>3</sup>Sistema Nacional de Investigación (SNI) de Panamá

**Fecha de recepción:** 2 de diciembre de 2024. **Fecha de aceptación:** 10 de septiembre de 2025.

**\*Autor de correspondencia:** [yazmin.mack@utp.ac.pa](mailto:yazmin.mack@utp.ac.pa)

**Resumen** La producción de acero es fundamental en la industria de la construcción debido a sus excepcionales propiedades mecánicas y su versatilidad. Este material se utiliza ampliamente en la construcción de edificios, puentes, infraestructuras y diversos proyectos, desempeñando un papel vital en el desarrollo urbano y económico global. La importancia del acero radica en su durabilidad, resistencia y capacidad de ser reciclado, lo que lo convierte en un material indispensable para las aplicaciones constructivas sostenibles. El objetivo de esta investigación es estudiar los impactos ambientales derivados de la producción de acero y analizar la variabilidad de estos impactos según declaraciones ambientales de producto (DAPs) disponibles a nivel internacional. En este contexto, se presenta la importancia y variabilidad de las DAPs en la producción de acero. Las DAPs proporcionan información crucial sobre los impactos ambientales de esta industria, destacando emisiones de gases de efecto invernadero, consumo de agua, consumo de energía y generación de residuos. Se recopilaron 24 DAPs de acero, se clasificaron y se tabularon los indicadores ambientales para posteriormente analizar esta información. Se observan diferencias significativas entre plantas siderúrgicas debido al tipo de energía utilizada y las prácticas operativas implementadas. La contribución de este artículo radica en ofrecer una perspectiva integral sobre la producción de acero y sus implicaciones ambientales, destacando la importancia de las DAPs y la necesidad de armonizar los métodos de evaluación de impacto ambiental para fomentar una construcción más sostenible.

**Palabras clave.** Acero, análisis de ciclo de vida (ACV), construcción sostenible, declaración ambiental de producto (DAP).

**Abstract** Steel production is critical in the construction industry due to its exceptional mechanical properties and versatility. This material is widely used in the construction of buildings, bridges, infrastructure, and various projects, playing a vital role in global urban and economic development. The importance of steel lies in its durability, resistance and ability to be recycled, which makes it an indispensable material for sustainable construction applications. The aim of this research is to study the environmental impacts derived from steel production and to analyse the variability of these impacts according to internationally available environmental product declarations (EPDs). In this context, the importance and variability of EPDs in steel production is presented. EPDs provide crucial information on the environmental impacts of this industry, highlighting greenhouse gas emissions, water consumption, energy consumption, and waste generation. 24 steel EPDs were collected, the environmental indicators were classified and tabulated and then this information was analysed. Significant differences are observed between steel plants due to the type of energy used and the operational practices implemented. The contribution of this paper lies in offering a comprehensive perspective on steel production and its environmental implications, highlighting the importance of EPDs and the need to harmonize environmental impact assessment methods to encourage more sustainable construction.

**Keywords.** Steel, life cycle assessment (LCA), sustainable construction, environmental product declaration (EPD).

## 1. Introducción

La producción de acero es crucial en la industria de la construcción debido a sus excepcionales propiedades mecánicas y su versatilidad para ser moldeado. Este material es ampliamente utilizado en la construcción de edificios, puentes, infraestructuras y diversos proyectos, jugando un papel vital en el desarrollo urbano y económico global. La importancia del acero radica en su durabilidad, resistencia y capacidad de ser reciclado, lo que lo convierte en un material indispensable en las aplicaciones constructivas sostenibles.

Sin embargo, la producción de acero conlleva significativos impactos ambientales, como lo son la emisión de gases de efecto invernadero, el alto consumo de energía y recursos naturales y la generación de residuos sólidos y líquidos. Estos impactos son el resultado de los procesos intensivos necesarios para extraer y refinar el hierro, así como para producir el acero en sus diversas formas. Por estas razones, la industria siderúrgica enfrenta el desafío de reducir estos efectos adversos para minimizar su huella ecológica.

Para evaluar y comunicar los impactos ambientales, se utilizan las Declaraciones Ambientales de Producto, DAPs, (EPD, por sus siglas en inglés). Las DAPs son “documentos de carácter voluntario que buscan ofrecer, de forma transparente, comparable y verificable, información relativa al comportamiento ambiental de los productos a lo largo de su ciclo de vida”[1].

La información contenida en una DAP se basa en la realización de una evaluación global y multicriterio de los impactos ambientales de un producto desde su origen hasta el final de su vida útil. Ello se hace utilizando el método de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), siguiendo las reglas que se establecen para cada categoría de producto sobre una base científica o reglamentaria. Son diversos los parámetros que se analizan, pero de forma genérica se pueden mencionar el potencial de calentamiento global, acidificación, consumo de energía y agua entre otros [2] (figura 1).

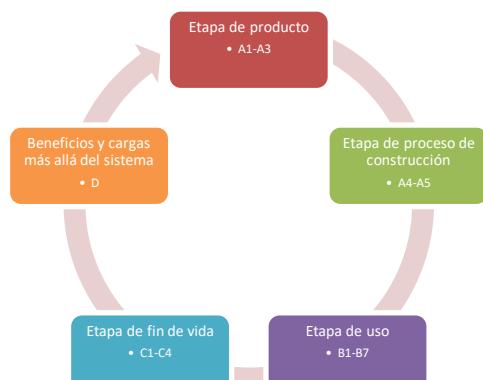


Figura 1. Etapas del ciclo de vida de un producto.

Fuente: ISO-14025-2006 [3].

### 1.1 Importancia de la producción de acero como material de construcción.

El acero, una aleación increíblemente versátil y duradera compuesta principalmente de hierro y carbono, ha dejado una huella imborrable en la industria de la construcción. Sus cualidades únicas lo han posicionado como el material elegido para crear estructuras duraderas [4].

Reconocido por su excepcional durabilidad, el acero ha seguido siendo una de las mejores opciones entre los constructores de todo el mundo. Su notable resistencia a la tracción permite que las estructuras soporten pesos inmenos, lo que lo convierte en un material ideal para construir puentes masivos y rascacielos imponentes.

La resistencia del acero a la corrosión y a las condiciones climáticas adversas mejora aún más la durabilidad de los edificios, incluso en los entornos más hostiles. Con diseño basado en los debidos estándares de construcción y un debido mantenimiento periódico, las construcciones de acero no sólo incurren en menores costos de vida útil, sino que también contribuyen a una mayor sostenibilidad [5].

### 1.2 El acero y el medio ambiente.

El impacto ambiental de la metalurgia gira en torno a su uso de energía, del agua y a su acción sobre el suelo, debido a los productos químicos y residuos que se generan durante el proceso de producción de metales y a su transformación del entorno en la extracción. La extracción y procesamiento de minerales puede generar grandes cantidades de residuos tóxicos y químicos que, si no se manejan adecuadamente, pueden contaminar el agua y el suelo circundantes, dañando los ecosistemas y la salud humana [6].

En el caso del acero, el proceso de producción puede generar grandes cantidades de emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes del aire, ya que requiere una gran cantidad de energía y combustibles fósiles para generar el calor y la energía necesarios. Además, este mismo proceso también puede generar residuos tóxicos, como escoria y gases de escape, que pueden contaminar el aire y el suelo circundantes [6], [7].

Sin embargo, el acero tiene el potencial de ser un material muy sostenible porque dura por mucho tiempo, es muy resistente y es fácil de reciclar [8]. Su reciclabilidad y reutilización inherentes promueven una economía circular, reduciendo la demanda de nuevos materiales y minimizando los residuos.

Las mejoras en los procesos de producción de acero también han aumentado la eficiencia energética y, como resultado, han reducido las emisiones de gases de efecto invernadero. Al seleccionar proveedores ambientalmente responsables de acero como material de construcción, los contratistas pueden mitigar la huella ambiental de sus

proyectos, contribuyendo a un futuro más amigable con el ambiente y sostenible.

### 1.3 Declaraciones Ambientales de Producto

La norma ISO 14025 define las DAPs o ecoetiquetas tipo III como “una manifestación que proporciona datos ambientales cuantificados utilizando parámetros predeterminados y, cuando corresponda, información ambiental adicional” [4]. Su objetivo es el mismo que el del resto de ecoetiquetas (tipo I y tipo II según clasificación ISO), esto es, fomentar la demanda y producción de aquellos productos que causan un menor impacto sobre el medio ambiente a través de la comunicación de información verificable y certera que estimule la mejora ambiental continua entre los agentes del mercado [4].

La diferencia de las DAPs con los otros sistemas regulados por la familia de normas ISO 14020, radica en que las DAP no definen requisitos ambientales o valores mínimos a cumplir, sino que se muestran objetivamente los resultados del estudio de ACV llevado a cabo sobre el producto para poder ofrecer una imagen del comportamiento ambiental del mismo [7]. Las DAP han de desarrollarse siguiendo lo establecido por la norma ISO 14025 sobre DAPs y las normas ISO 14040 e ISO 14044 de análisis de ciclo de vida (ACV) [7].

Así, que un producto disponga de una DAP no significa que sea medioambientalmente mejor o peor que otro que no disponga de ella, pues su objetivo es proporcionar información del desempeño ambiental del producto para permitir comparaciones con otros productos similares, y no identificar productos ecológicos. No obstante, y debida a la posibilidad de esta comparación, las DAPs pueden ayudar a la toma de decisiones en una compra bajo aspectos ambientales [7].

### 1.3 Variabilidad en los impactos ambientales de la producción de acero.

La industria del acero ha tomado el cambio climático como un desafío importante, mejorando la eficiencia energética, llegando hoy día a operar cerca de los límites establecidos para las tecnologías de producción de acero. En 30 años, de 1975 a 2005, la industria del acero redujo el consumo de energía por tonelada de acero producida cerca de un 50%. Sin embargo, debido a esta mejora en la eficiencia energética, el espacio para realizar mejoras adicionales es pequeño, partiendo de la base de la matriz energética actual.

El gas de efecto invernadero (GEI) de mayor importancia para la industria del acero es el CO<sub>2</sub>, en promedio 1.8 toneladas de CO<sub>2</sub> son emitidas a la atmósfera por cada tonelada de acero producido. Según la Agencia Internacional de Energía (en inglés, *International Energy Agency*), la industria del hierro y el acero representó en 2011 el 6.7% del total de emisiones de CO<sub>2</sub>, lo que demuestra que la producción de acero es una de las industrias más intensivas en generación de CO<sub>2</sub> [8]. Es

importante considerar que la intensidad de CO<sub>2</sub> varía dependiendo de la ruta tecnológica de la producción de acero (figura 2).

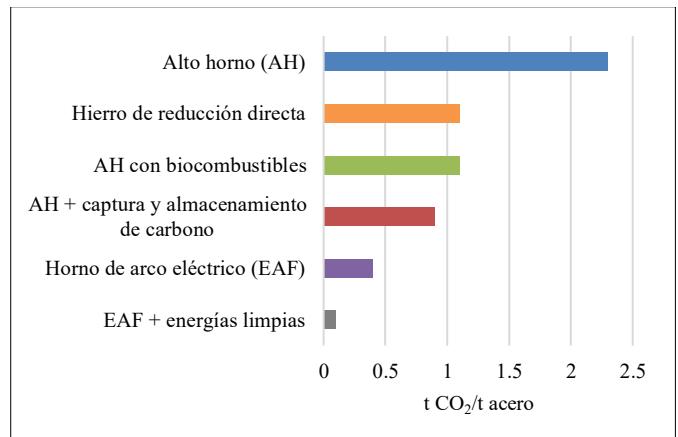


Figura 2. Gráfico de la intensidad de CO<sub>2</sub> de diferentes tipos de producción de acero.

Fuente: Adaptado de *The Circular Economy a Powerful Force for Climate Mitigation* (2018) página 61 [9].

En las décadas de 1970 y 1980, las siderúrgicas necesitaban un promedio de 144 kg de materias primas para producir 100 kg de acero. Con inversiones en investigación, mejoras tecnológicas y una buena planificación, la industria siderúrgica de hoy solo utiliza 115 kg de insumos para hacer 100 kg de acero, lo que representa un ahorro del 20.1% de materias primas [8].

El reciclaje es tal vez el más reconocido atributo del acero, dado que supone ahorros en materias primas y energía. Más de 1,400 kg de mineral de hierro, 770 kg de carbón y 150 kg de piedra caliza se ahorran por una tonelada de acero reciclado. Desde el punto de vista ambiental, el reciclaje del acero tiene un enorme impacto en la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Si una tonelada de acero laminado en caliente se produce a partir de 100% de chatarra en lugar de nuevos materiales, el ahorro total de CO<sub>2</sub> sería de 1.41 toneladas al año [8].

La Asociación Mundial del Acero, ha publicado tres inventarios de ciclo de vida (ICV) del acero, 1995, 2000 y 2010, el último con la utilización ya de las especificaciones de las normas ISO 14040:2006 y 14044:2006, el ICV cuenta con datos de 49 productores de acero de 17 países, cubriendo un 25% de la producción mundial de acero.

Al operar cerca de los límites establecidos para las tecnologías de producción de acero, la industria ha planteado cinco nuevas tecnologías de producción para disminuir más su impacto ambiental y alcanzar mayores niveles de reducción de las emisiones de GEI, estas tecnologías son: captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub>, utilización de hidrógeno como agente reductor del mineral de hierro, utilización de electrodos como agentes reductores del mineral de hierro, utilización de

biomasa para generar el agente reductor (carbón o gas de síntesis), uso de tecnologías para la captura y almacenamiento del CO<sub>2</sub> de combustibles fósiles para transformarlo en carbonatos (almacenamiento mineralógico) [8].

### 1.3 Objetivo de la investigación

El objetivo de esta investigación es estudiar los impactos ambientales derivados de la producción de acero y analizar la variabilidad de estos impactos según las declaraciones ambientales de producto disponibles a nivel internacional.

A través de este estudio, se pretende proporcionar una compresión más profunda de las diferencias en los impactos ambientales reportados y ofrecer recomendaciones para mejorar la comparabilidad y la transparencia de las DAP en la industria del acero. Al identificar las principales fuentes de variabilidad y proponer soluciones para su mitigación, se espera contribuir a la promoción de prácticas más sostenibles en la producción y uso del acero.

La contribución de este artículo radica en ofrecer una perspectiva integral sobre la producción de acero y sus implicaciones ambientales, destacando la importancia de las DAP y la necesidad de armonizar los métodos de evaluación para fomentar una construcción más sostenible. Además, se espera que los hallazgos de esta investigación ayuden a informar políticas y regulaciones que impulsen la sostenibilidad en el sector de la construcción y la producción de materiales.

## 2. Materiales y métodos

Los pasos seguidos para lograr el objetivo de este estudio fueron los siguientes:

### 2.1 Recolección de DAPs

La búsqueda de DAPs se realizó utilizando la plataforma Ecoplatform (<https://www.eco-platform.org/epd-data.html>) utilizando el término “steel reinfoc” como palabra clave para la búsqueda de DAPs de la producción de acero. Se obtuvieron 24 DAPs.

### 2.2 Tabulación de datos de las DAPs

Las variables para analizar incluyen: el programa de DAP, la empresa, la categoría, la densidad del acero, los distintos indicadores ambientales y la unidad de cada indicador. A fin de una mejor organización para el manejo de los datos, se utilizó Excel.

Todas las DAPs estudiadas están normalizadas y son comparables, se unificaron las unidades de medida en los casos necesarios. Se evaluó la A1-A3 correspondiente a la etapa de producción dentro del ciclo de vida del acero (A1: extracción de materias primas, A2: transporte y A3: manufactura).

### 2.3 Análisis de datos de las DAPs

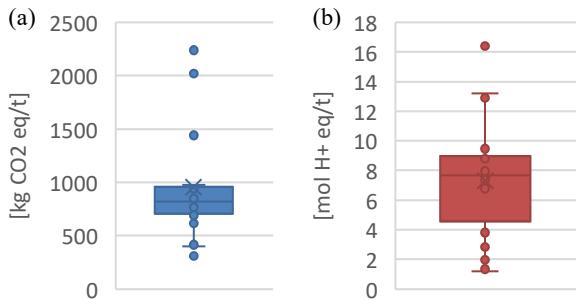
Para evaluar el impacto, se realizó una selección de indicadores relevantes donde se puede comparar la información en las DAPs. Los indicadores se refieren a la producción de 1 tonelada de acero de refuerzo. Estos indicadores son:

- Potencial de calentamiento global, GWP [kg CO<sub>2</sub> eq]: Mide las emisiones de gases de efecto invernadero, convertido en equivalentes de CO<sub>2</sub> (ODS 13).
- Potencial de acidificación, AP [mol H<sup>+</sup> eq]: Evalúa la emisión de sustancias que pueden acidificar el suelo y el agua (ODS 14).
- Potencial de eutrofización, EP - agua dulce [kg (PO<sub>4</sub>)<sup>3-</sup> eq]: Mide la cantidad de nutrientes que pueden causar eutrofización en cuerpos de agua dulce (ODS 6).
- Potencial de eutrofización, EP - marina [kg N eq]: Evalúa la cantidad de nutrientes que pueden causar eutrofización en ambientes marinos (ODS 14).
- Uso total de recursos energéticos primarios renovables (energía primaria y recursos energéticos primarios utilizados como materias primas, PERT [MJ]: Refleja la dependencia de recursos energéticos renovables (ODS 7).
- Uso total de recursos energéticos primarios no renovables (energía primaria y recursos energéticos primarios utilizados) [MJ]: Indica la dependencia de recursos energéticos no renovables (ODS 7).
- Uso neto de agua dulce, FW [m<sup>3</sup>]: Evalúa el volumen total de agua dulce utilizada durante el ciclo de vida de un producto (ODS 6).
- Residuos peligrosos dispuestos, HWD [kg]: Refleja la carga de residuos peligrosos sobre los sistemas de gestión de residuos (ODS 12).
- Residuos no peligrosos dispuestos, NHWD [kg]: Refleja la carga de residuos no peligrosos sobre los sistemas de gestión de residuos (ODS 12).
- Residuos radiactivos eliminados, RWD [kg]: Indica el impacto de los residuos radiactivos en la gestión de residuos y el medio ambiente [4] (ODS 12).

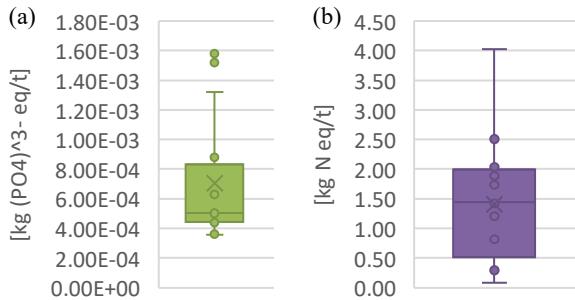
## 3. Resultados

A continuación, se detallan los indicadores ambientales estudiados de diversas plantas de producción de acero y su variabilidad. Cada punto corresponde a la información de una DAP para la producción de acero (A1-A3) respecto a distintos indicadores de impacto ambiental: potencial de calentamiento global (figura 3a), potencial de acidificación (figura 3b), potencial de eutrofización (agua dulce) (figura 4a) y potencial de eutrofización (marino) (figura 4b); uso total de recursos energéticos primarios renovables (figura 5a), uso total de recursos energéticos primarios no renovables (figura 5b), uso neto de agua dulce (figura 6a), residuos radiactivos eliminados

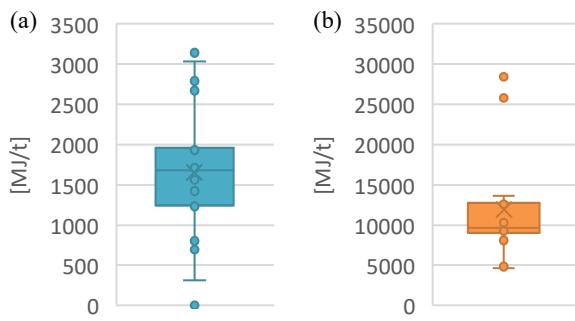
(figura 6b), residuos peligrosos dispuestos (figura 7a) y residuos no peligrosos dispuestos (figura 7b).



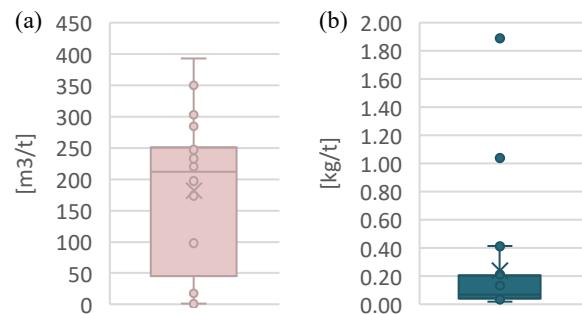
**Figura 3.** Variabilidad de las DAPs estudiadas respecto a los indicadores de (a) potencial de calentamiento global y (b) potencial de acidificación.



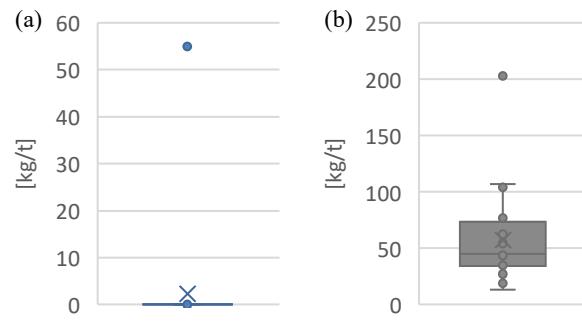
**Figura 4.** Variabilidad de las DAPs estudiadas respecto a los indicadores de (a) potencial de eutrofización, agua dulce y (b) potencial de eutrofización, marino.



**Figura 5.** Variabilidad de las DAPs estudiadas respecto a los indicadores de (a) uso total de recursos energéticos primarios renovables y (b) uso total de recursos energéticos primarios no renovables.



**Figura 6.** Variabilidad de las DAPs estudiadas respecto a los indicadores de (a) uso neto de agua dulce y (b) residuos radiactivos eliminados.



**Figura 7.** Variabilidad de las DAPs estudiadas respecto a los indicadores de (a) residuos peligrosos dispuestos y (b) residuos no peligrosos dispuestos.

Los impactos ambientales de la producción de acero presentan una considerable variabilidad. El potencial de calentamiento global varía entre 416.00-957.13 kg CO<sub>2</sub> eq/t, mientras que el potencial de acidificación oscila entre 1.35-12.9 mol H<sup>+</sup> eq/t. El potencial de eutrofización en agua dulce se encuentra entre 3.62E-04 y 8.80E-04 kg (PO<sub>4</sub>)<sup>3-</sup> eq/t, y el potencial de eutrofización marino varía entre 0.29-2.51 kg N eq/t. El uso total de recursos energéticos primarios renovables está en el rango de 696-2790 MJ/t, mientras que el uso total de recursos energéticos primarios no renovables oscila entre 4840-12600 MJ/t. El uso neto de agua dulce varía entre 1.09-356.00 m<sup>3</sup>/t. En cuanto a los residuos, los residuos radiactivos eliminados se encuentran entre 0.04 y 0.41 kg/t, los residuos peligrosos dispuestos varían entre 0.000000791-0.1 kg/t, y los residuos no peligrosos dispuestos oscilan entre 18.9-104 kg/t. Estos rangos indican la diversidad de impactos ambientales en la producción de acero y resaltan la importancia de optimizar procesos para reducir estos efectos.

Las Declaraciones Ambientales de Producto (DAP) ofrecen información detallada sobre los efectos ambientales relacionados con la fabricación de un producto. Las DAP de BRE Global cumplen con normativas específicas como ISO 14025 y EN 15804, siendo esenciales para evaluar y comparar la sostenibilidad de distintos procesos de producción de acero.

## 4. Discusión de los resultados

La mayor parte de los impactos ambientales se produce durante la fase de producción (A1-A3). Las diferencias entre plantas se deben principalmente a la eficiencia tecnológica y las fuentes de energía utilizadas. Por ejemplo, las emisiones de CO<sub>2</sub> son considerablemente más bajas en la planta de NatSteel Holdings Pte Ltd en comparación con Qatar Steel Company, debido a las diferencias en los procesos y la eficiencia energética. La variabilidad en los impactos ambientales de la producción de acero puede atribuirse a varios factores:

- Energía empleada: La producción mediante hornos de arco eléctrico (EAF) y la producción basada en chatarra varía en eficiencia y generación de CO<sub>2</sub>.
- Rutas tecnológicas de producción: Existen diferencias en la eficiencia de los hornos, por ejemplo.
- Procedencia de materias primas: Empleo de hierro reducido directo y chatarra reciclada.
- Prácticas operativas: Variaciones en la eficiencia de la gestión y las prácticas operativas.
- Metodologías de inventario de emisiones y errores de medición.

Los resultados destacan la posibilidad de adoptar tecnologías más avanzadas y limpias. Las plantas con tecnologías más eficientes no solo reducen las emisiones de CO<sub>2</sub>, sino que también disminuyen el consumo de energía y la generación de residuos. Como se pudo observar en los resultados, la variabilidad entre productores de acero puede ser significativa. El uso de DAPs permite a los contratistas no solo seleccionar al proveedor de acero con base en el desempeño mecánico del material, pero también con base en el desempeño ambiental del producto. Para minimizar los impactos ambientales, la industria del acero puede:

- Invertir en tecnologías sostenibles: incorporar tecnologías más eficientes y ecológicas.
- Optimizar el uso de materias primas recicladas: dar prioridad al uso de acero reciclado.
- Mejorar las prácticas operativas: adoptar prácticas operativas sostenibles y eficaces.
- Cumplir y superar las regulaciones ambientales: aspirar a estándares más altos y mejores prácticas.

## 5. Conclusiones

Los resultados indican que, aunque la industria del acero ha realizado avances significativos en la reducción de su impacto ambiental, todavía existen oportunidades para realizar mejoras adicionales. Se pudo observar la importancia del reciclaje en la producción de acero ya que contribuye significativamente a la reducción de emisiones, al ahorro de materias primas y la reutilización del acero promoviendo una economía circular.

La industria del acero desempeña un papel vital en la disminución de su huella ambiental y en la promoción de prácticas más sostenibles a nivel mundial. La variabilidad en los impactos ambientales de la producción de acero, demostrada por las DAP de BRE Global, destaca la importancia de una transición hacia tecnologías más sostenibles, el uso de energías renovables y la selección de proveedores con base en su desempeño ambiental.

## AGRADECIMIENTOS

Al Sistema Nacional de Investigación (SNI) de Panamá.

## REFERENCIAS

- [1] P. Turrado Rabanedo, 'Trabajo de investigación sobre la influencia en la fase de construcción de la aplicación de declaraciones ambientales de producto a infraestructuras', 2015. Accessed: Jun. 14, 2024. [Online]. Available: <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/6946>
- [2] A. F. Puig, N. P. Torrents, J. M. Muñoz, J. J. V. Serra, S. S. Martí, and C. G. Santos, 'PROGRAMA de EPD's: Declaraciones Ambientales de Producto para el sector de la construcción'.
- [3] International Organization for Standardization, 'ISO 14025:2006 Environmental labels and declarations -- Type III environmental declarations -- Principles and procedures', 2006.
- [4] M. Palmieri, F. Ragaglia, S. Patanè, P. Piana, C. Ingrao, and A. Bertino, "Environmental product declaration as a strategy to apply bio economy in the sustainable steel sector", 2017.
- [5] N. S. Trahair, M. A. Bradford, D. Nethercot, and L. Gardner, *The Behaviour and Design of Steel Structures to EC3*, 4th ed. London: CRC Press, 2017. doi: 10.1201/9781315273518.
- [6] D.-A. Iluțiu-Varvara and C. Aciu, 'Metallurgical Wastes as Resources for Sustainability of the Steel Industry', *Sustainability*, vol. 14, no. 9, Art. no. 9, Jan. 2022, doi: 10.3390/su14095488.
- [7] Z. Fan and S. J. Friedmann, 'Low-carbon production of iron and steel: Technology options, economic assessment, and policy', *Joule*, vol. 5, no. 4, pp. 829–862, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.joule.2021.02.018.
- [8] C. Broadbent, 'Steel's recyclability: demonstrating the benefits of recycling steel to achieve a circular economy', *Int J Life Cycle Assess*, vol. 21, no. 11, pp. 1658–1665, Nov. 2016, doi: 10.1007/s11367-016-1081-1.

- [9] Material Economics, *"The circular economy a powerful force for climate mitigation"*, 2018.
- [10] G. H. Cadavid Marín, 'Análisis de Ciclo de Vida (ACV) del proceso siderúrgico', Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia, 2014. [Online]. Available: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/51270/8111505.2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [11] 'ISO 14025:2006(en), Environmental labels and declarations — Type III environmental declarations — Principles and procedures'. Accessed: Jun. 14, 2024. [Online]. Available: <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:14025:ed-1:v1:en>