

Valorización de residuos generados en los procesos de la industria
siderúrgica, una revisión bibliográfica

Jorge Mario Rojas Gómez

Programa de Ingeniería Ambiental
Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil
Universidad Antonio Nariño
Duitama
2023

Valorización de residuos generados en los procesos de la industria
siderúrgica, una revisión bibliográfica

Jorge Mario Rojas Gómez

Documento presentado como requisito para optar por el título de Ingeniero Ambiental

Director: Ingeniera Jessica Lorena Cifuentes Lopez

Programa de Ingeniería Ambiental
Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil
Universidad Antonio Nariño
Duitama
2023

VALORIZACIÓN DE RESIDUOS GENERADOS EN LOS PROCESOS DE LA INDUSTRIA SIDERÚRGICA: UNA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

*(VALORIZATION OF WASTES GENERATED IN STEEL INDUSTRY PROCESSES: A
BIBLIOGRAPHIC REVIEW)*

Rojas Gómez, Jorge Mario¹, Cifuentes López Jessica Lorena²;

¹ Universidad Antonio Nariño, Colombia, jorojas65@uan.edu.co

² Universidad Antonio Nariño, Colombia, jcifuentes58@uan.edu.co

Resumen: El sector siderúrgico, al ser una parte fundamental de la industria, enfrenta desafíos significativos. La producción de acero es intrínsecamente un proceso intensivo en recursos que conlleva la generación de cantidades considerables de residuos, situándolo en el epicentro del debate sobre la responsabilidad ambiental y la eficiencia en el uso de recursos. Este trabajo de grado se enfoca en abordar este desafío mediante la valorización de estos subproductos, constituyendo un enfoque clave en la promoción de la sostenibilidad y la gestión ambiental en este contexto. El objetivo principal de esta investigación es realizar una revisión bibliográfica exhaustiva para analizar las prácticas de valorización de residuos en la industria siderúrgica colombiana a través de la selección y análisis crítico de estudios científicos y casos de éxito. Los resultados obtenidos de esta revisión subrayan la importancia de estas prácticas en la industria siderúrgica, no sólo en términos de reducción de desechos y minimización del impacto ambiental, sino también en la generación de oportunidades económicas. La valorización no solo contribuye a la economía circular, sino que también fomenta la eficiencia en el uso de recursos y la creación de subproductos de valor, resaltando la importancia de estas técnicas como una estrategia esencial para contribuir al desarrollo sostenible. Los hallazgos alcanzados apuntan a la necesidad de promover la adopción de estas prácticas a través de políticas y regulaciones, así como de la colaboración entre diferentes actores del sector. La valorización de residuos no solo contribuye a la gestión ambiental responsable, sino que también ofrece oportunidades económicas y mejoras en la eficiencia de los procesos, impulsando así una transformación positiva en la industria siderúrgica colombiana hacia un modelo más sostenible.

Palabras claves: Valorización de residuos, Industria siderúrgica, Economía circular, Gestión de residuos, Impacto ambiental, Desarrollo sostenible, Escoria, Medio ambiente, Residuos industriales.

Abstract: The steel sector, being a fundamental part of the industry, faces significant challenges. Steel production is inherently a resource-intensive process that involves the generation of considerable amounts of waste, placing it at the epicenter of the debate on environmental responsibility and resource efficiency. This degree work focuses on addressing this challenge through the valorization of these by-products, constituting a key approach in the promotion of sustainability and environmental management in this context. The main objective of this research is to conduct a comprehensive literature review to analyze waste valorization practices in the Colombian steel industry through the selection and critical analysis of scientific studies and success stories. The results obtained from this review underline the importance of these practices in the steel industry, not only in terms of waste reduction and minimization of environmental impact, but also in the generation of economic opportunities. Valorization not only contributes to the circular economy, but also promotes resource efficiency and the creation of valuable by-products, highlighting the importance of these techniques as an essential strategy to contribute to sustainable development. The findings point to the need to promote the adoption of these practices through policies and regulations, as well as collaboration between different actors in the sector. Waste valorization not only contributes to responsible environmental management, but also offers economic opportunities and improvements in process efficiency, thus driving a positive transformation in the Colombian steel industry towards a more sustainable model.

Key words: Waste valorization, Steel industry, Circular economy, Waste management, Environmental impact, Sustainable development, Slag, Environment, Industrial waste.

INTRODUCCIÓN

La industria siderúrgica desempeña un papel fundamental en la economía global gracias a su destacada contribución a la producción de acero, un recurso de gran relevancia para múltiples sectores industriales. Sin embargo, este protagonismo viene acompañado por un desafío significativo: la generación considerable de residuos, en su mayoría en forma de escorias. En un contexto donde la sostenibilidad ambiental se ha convertido en una prioridad ineludible, la gestión adecuada de los subproductos industriales emerge como un imperativo para las empresas (Sánchez García, 2010).

La implementación de prácticas de valorización en los procesos productivos de las empresas siderúrgicas se erige como un tema de considerable trascendencia, dado que aborda una amplia gama de factores que involucran aspectos medioambientales, legales, sociales y económicos. La recuperación efectiva de estos residuos se convierte en una pieza fundamental para la consecución de una reducción significativa de los efectos adversos que estos puedan generar (Suárez, 2017).

De esta manera, la ejecución de este proyecto se traducirá en la generación de un extenso corpus de información relativa a los procedimientos de valorización de residuos siderúrgicos en Colombia. Este, mediante la elaboración de un artículo técnico-científico con el propósito de diseminar conocimientos a la comunidad académica y a todas las personas interesadas en el campo. Además, la revisión aportará significativamente al avance de otras investigaciones al presentar alternativas y soluciones pertinentes en este contexto.

La metodología para este propósito incluirá una revisión bibliográfica cualitativa que incluye la recopilación de información de fuentes académicas y técnicas relevantes, la revisión sistemática de la literatura utilizando la aplicación Parsifal, y un análisis crítico de las estrategias y su aplicabilidad en el contexto colombiano.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La industria siderúrgica, a pesar de la implementación de estrategias y procesos basados en los principios de producción sostenible, continúa generando una cantidad significativa de desechos. La comunidad científica y el sector industrial, en su continua búsqueda de soluciones a este desafío ambiental, han desarrollado técnicas para la valorización de los residuos industriales. Estas prácticas no solo tienen en cuenta consideraciones técnicas y ambientales, sino que también incorporan aspectos relacionados con la eficiencia productiva; además puntos de vista financieros. Este enfoque integral permite alcanzar un equilibrio entre los imperativos industriales y los objetivos ambientales (Parra y Sánchez, 2010). A pesar de la existencia de regulaciones y directrices relacionadas con la gestión de residuos industriales, persisten desafíos que obstaculizan la adopción de estrategias de valorización en el sector siderúrgico.

Uno de los desechos de gran relevancia generados en la industria del acero son las escorias; la falta de implementación de prácticas destinadas a la valorización de estos residuos en la industria siderúrgica genera un impacto negativo en el entorno ambiental y resulta en la pérdida de oportunidades tanto económicas como en términos de desarrollo sostenible. En este contexto, se ha observado un desarrollo global de diversas aplicaciones, particularmente en el ámbito de la construcción y la infraestructura vial que han arrojado resultados favorables y prometedores. Estos "residuos" han llegado al punto de ser catalogados como coproductos de la industria siderúrgica, debido a la importante valorización que han adquirido en los últimos años (Gorrín et al., 2016).

En este marco resulta esencial disponer de información pertinente acerca del tema. Por consiguiente, yace el siguiente interrogante: ¿De qué manera las prácticas de valorización de residuos industriales siderúrgicos pueden propiciar un valor económico y medioambiental?

ESTADO DEL ARTE

La industria siderúrgica, un actor de relevancia global en la producción de acero, posee un impacto significativo tanto en la economía como en el entorno ambiental. Sin embargo, esta conlleva la generación masiva de residuos, cuyo inadecuado manejo puede generar consecuencias adversas en el medio ambiente (Orrego Santa, 2015).

La escoria de alto horno ha ganado interés creciente en la manufactura de diversos materiales, especialmente en el ámbito de la construcción. Su versatilidad es reflejada en diversas aplicaciones como en la producción de cementos, concretos, tejas, ladrillos, así como en la estabilización de suelos y la fabricación de vitrocerámicas, entre otros usos. Esta utilización de subproductos industriales está alineada con prácticas ecológicas, contribuyendo a la reducción de emisiones de dióxido de carbono debido al menor consumo de materias primas (Malagón & Ramos, 2023).

En particular, las escorias, subproductos de la producción de acero en Colombia, se generan en cantidades considerables, estimándose entre 10 y 30 % por cada tonelada de acero fabricado. Este volumen acentúa la importancia de abordar su gestión de manera técnica y sostenible (Sánchez, 2016).

El paradigma contemporáneo de la sostenibilidad, intrínsecamente vinculado al concepto de "Economía Circular", representa una respuesta al agotamiento del modelo económico lineal tradicional, marcado por las etapas de extracción, fabricación, uso y eliminación. Este nuevo enfoque pivota hacia la utilización y optimización de residuos, así como la gestión eficiente de flujos generados por otros materiales, con la meta central de maximizar la eficiencia en el uso de los recursos (Rubio, 2018).

La industria del acero puede ser considerada un caso de economía circular, en el cual busca mantenerse el valor de los productos, materiales y recursos dentro de la economía por el mayor tiempo posible, minimizando la generación de residuos. La valorización y el aprovechamiento de los desechos como de subproductos industriales en la actualidad se consideran una solución para reducir la huella de carbono y abordar los impactos ambientales asociados a la producción industrial. Sin embargo, establecer una economía circular basada en estos subproductos no es una tarea sencilla. Esto se debe en parte a la percepción cultural arraigada de que los productos fabricados con materias primas alternativas pueden no ser adecuados para los mismos usos que los elaborados con materias primas vírgenes. Por otra parte, en algunos casos la falta de investigaciones y la ausencia de normativas técnicas relacionadas con el uso de residuos pueden limitar la viabilidad industrial de ciertos procesos de valorización, especialmente en el contexto de las tecnologías contemporáneas (Paya Bernabéu, 2012).

En Boyacá se han adoptado estrategias de gestión ambiental integral que engloba la valorización de las escorias como un componente en la industria de la construcción, entre otros propósitos. Estas medidas no solo fomentan la sostenibilidad en la industria del acero, sino que también disminuyen los impactos negativos en el entorno medioambiental (Parra Araque & Sánchez García, 2010). En la actualidad, se pueden promover oportunidades para la valorización de residuos en empresas mediante políticas y regulaciones, un enfoque de economía circular, inversiones tecnológicas, educación, colaboración sectorial y la identificación de oportunidades comerciales a partir de residuos valorizados. Esto contribuye a la sostenibilidad ambiental y económica, como ejemplifican casos exitosos en diversos sectores (Arancon et al., 2013).

MARCO CONCEPTUAL

La comprensión y el análisis de diversos conceptos son esenciales para esta investigación, ya que proporcionan el fundamento teórico necesario para abordar de manera efectiva los objetivos planteados. En este contexto, se abordan algunos conceptos clave que proporcionan una base sólida y enriquecedora para el desarrollo de la investigación.

Residuos siderúrgicos

Los desechos derivados de la industria siderúrgica consisten en una combinación de varios elementos tales como escoria, polvo, lodos y cenizas que surgen como resultado del proceso de fabricación de acero. Es posible que estos residuos contengan metales pesados y otros contaminantes. La escoria es producida cuando las impurezas presentes en el carbón y el mineral de hierro se funden y combinan con la cal empleada como fundente en la fundición. Este residuo puede tener varios usos, como, por ejemplo, ser utilizado en vertederos para proyectos de recuperación, en la construcción de carreteras y productos como adoquines, bloques. La mayoría de los desechos sólidos generados en la elaboración de acero pueden ser valorizados y reutilizados (Enciclopedia de la OIT, 2003).

Economía circular

El núcleo de la economía circular radica en optimizar al extremo la reutilización de los recursos generados e incorporarlos eficazmente en el ciclo de producción. Esta perspectiva, denominada

valorización de residuos, ha ido cobrando cada vez más relevancia en la investigación, mostrando un potencial significativo (Pérez García, 2019).

La economía circular (EC), en estrecha relación con la economía industrial (EI), está adquiriendo un papel protagónico. Esto implica que los sectores productivos deben desarrollar estrategias que se centren en la preservación del medio ambiente, considerando la creciente escasez de recursos productivos y energéticos (Sarabia, Sánchez y Leyva, 2017).

Valorización de residuos

El proceso de valorización de residuos industriales se define como la instancia que permite la recuperación de materiales o energía a partir de los desechos generados por la actividad industrial. Ante el significativo volumen de residuos producidos y los desafíos asociados a su tratamiento y eliminación, la valorización se erige como una práctica fundamental. Esta operación engloba la integración de desechos de otros procesos en los sistemas productivos, utilizándolos como materias primas para cerrar el ciclo productivo (Farías, 2017).

En el ámbito de la industria siderúrgica colombiana, se han desplegado diversas estrategias y procedimientos de valorización con la finalidad de mitigar el impacto ambiental y propulsar la economía circular. Una táctica recurrente implica la recuperación y reutilización de subproductos y desechos generados durante los procesos de producción, tales como la escoria y los lodos de acería. Estos materiales encuentran aplicaciones variadas, desde servir como materias primas en la fabricación de cemento hasta desempeñar roles esenciales en la construcción de carreteras, formando componentes clave en la producción de concreto y participando en diversas otras aplicaciones (Revista EIA, 2016).

Impacto Ambiental

Un impacto ambiental se define como la modificación en la calidad del entorno natural debido a una actividad humana concreta. No todos los cambios mensurables en los componentes del medio ambiente constituyen impactos ambientales; ya que es fundamental evitar incluir las variaciones naturales causadas por factores como las estaciones del año o perturbaciones cíclicas. Para que un cambio sea considerado un impacto ambiental, debe estar directa o indirectamente relacionado con una actividad humana por otra parte en el contexto de evaluaciones específicas, debe poder

atribuirse a la actividad en cuestión. Además, se requiere una evaluación que determine si el cambio es positivo o negativo, y en qué medida (Salvador et al., 2005).

Desarrollo Sostenible

El concepto de desarrollo sostenible se configura con el objetivo principal de satisfacer las necesidades presentes sin poner en riesgo la capacidad de las generaciones futuras para cubrir sus propias necesidades. Este enfoque implica una integración completa de factores económicos, sociales y ambientales en el proceso de toma de decisiones además en la formulación de estrategias de desarrollo. La noción de desarrollo sostenible ganó notoriedad a través del informe titulado "Nuestro Futuro Común," publicado en 1987 por la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo de las Naciones Unidas (Munier, 2005). En el contexto colombiano, el desarrollo sostenible es un tema de gran relevancia, respaldado por su inclusión en políticas y programas gubernamentales como el Plan Nacional de Desarrollo y la Política Nacional de Desarrollo Sostenible. Además, diversas entidades y grupos de la sociedad civil en Colombia, incluyendo la Red Colombiana de Desarrollo Sostenible y la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería, están activamente involucrados en asuntos relacionados con la promoción del desarrollo sostenible (CEPAL, 2023).

OBJETIVOS

GENERAL

Realizar una revisión bibliográfica de los procesos de valorización de residuos en la industria siderúrgica en Colombia

ESPECÍFICOS

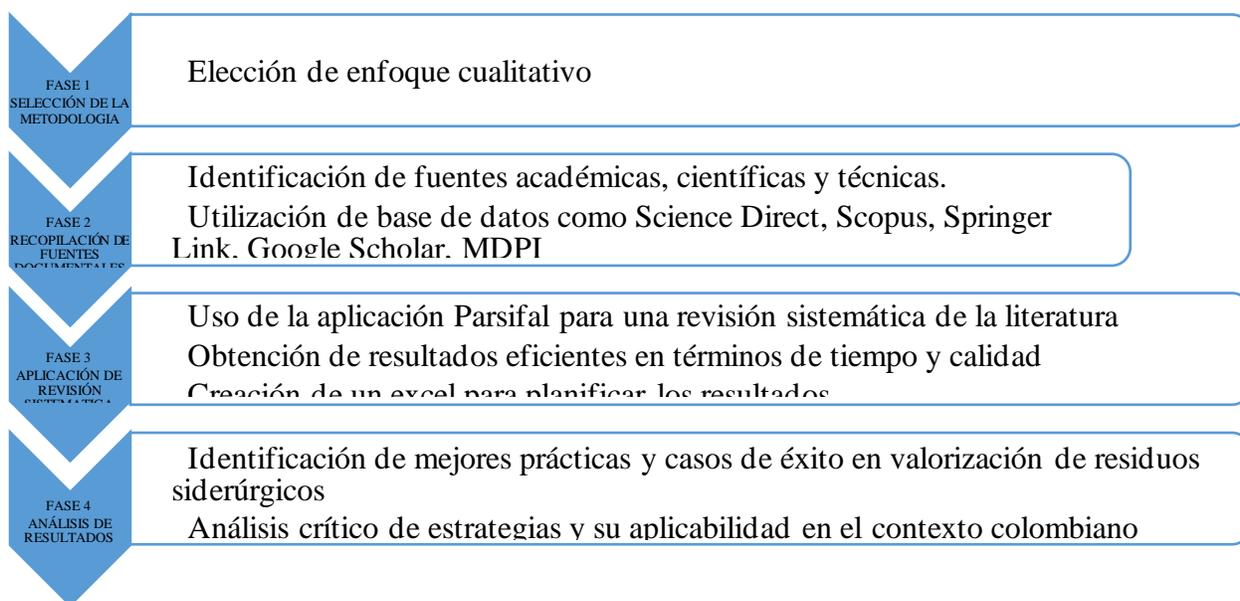
- Reunir datos bibliográficos con el fin de resaltar la relevancia de las prácticas de revalorización de los desechos industriales provenientes de la siderurgia.
- Examinar los impactos ambientales y económicos de las técnicas de valorización.
- Reconocer y evaluar los desafíos u impedimentos que la industria enfrenta al implementar métodos de valorización y sugerir algunas recomendaciones.

METODOLOGÍA

Con el propósito de realizar un análisis exhaustivo de los procesos de valorización de residuos en la industria siderúrgica colombiana y comprender su impacto tanto en términos ambientales como económicos, se optó por emplear una metodología de revisión bibliográfica con enfoque cualitativo. Esta elección metodológica permitió una investigación detallada de las fuentes documentales pertinentes relacionadas con la gestión de residuos en la industria siderúrgica. La revisión se centró en la recopilación de información proveniente de fuentes académicas, científicas y técnicas, tales como Science Direct, Scopus, Springer Link, Google Scholar y MDPI, lo que resultó en una colección de 74 artículos de alta calidad para avanzar en el proyecto. Para llevar a cabo una revisión sistemática de la literatura, se utilizó la aplicación Parsifal, la cual ofrece una mayor eficiencia tanto en tiempo como en calidad de resultados, permitiendo la elaboración de un archivo para planificar los resultados. Este enfoque no solo permite identificar las mejores prácticas y casos exitosos, sino también facilita un análisis crítico de las estrategias empleadas y su aplicabilidad en el contexto colombiano.

Gráfica 1

Desarrollo metodología



Fuente: Autor

Planificación

Para estructurar esta investigación, se siguió una metodología basada en el enfoque PICOC, conocido por su acrónimo, que descompone los elementos esenciales en términos de Población, Intervención, Comparación, Resultados y Contexto. Estos criterios se aplicaron de manera estricta como un marco de orientación para el proceso de selección y exclusión de los artículos identificados en las diversas bases de datos utilizadas en la investigación.

Tabla 1

Análisis PICOC

PICOC (Parámetros)	Preguntas	Resultado
POPULATION	<u>¿Quién?</u>	Investigaciones asociadas a valorización de residuos siderúrgicos.
INTERVENTION	<u>¿Qué?</u>	Revisión bibliográfica de prácticas de valorización de residuos en la industria siderúrgica colombiana.
COMPARISON	<u>¿Con qué comparar?</u>	Casos de éxito a nivel mundial
OUTCOME	<u>¿Qué se quiere encontrar?</u>	Análisis de técnicas de valorización de residuos en la industria siderúrgica colombiana y sus efectos en términos ambientales y económicos.

PICOC (Parámetros)	Preguntas	Resultado
CONTEXT	<u>¿En qué categoría de organización?</u>	Académico

Fuente: Autor

Después de establecer los criterios del enfoque PICOC, las preguntas de investigación se formularon de la siguiente manera:

- 1) ¿Cuáles son las prácticas de valorización de residuos más comunes en la industria siderúrgica colombiana?
- 2) ¿Cuál es el impacto ambiental de las prácticas de valorización de residuos en la industria siderúrgica colombiana?
- 3) ¿Qué oportunidades económicas se generan a partir de las prácticas de valorización de residuos en la industria siderúrgica colombiana?
- 4) ¿Cuáles son los desafíos u obstáculos que enfrenta la industria siderúrgica colombiana en la aplicación de métodos de valorización de residuos siderúrgicos?
- 5) ¿Qué soluciones se proponen para superar los desafíos u obstáculos en la aplicación de métodos de valorización de residuos siderúrgicos en la industria siderúrgica colombiana?

Criterios de inclusión y exclusión

Tabla 2

Parámetros para la inclusión y exclusión de artículos

INCLUSIÓN DE ARTÍCULOS	EXCLUSIÓN DE ARTÍCULOS
Estudios relacionados con la valorización de residuos industriales siderúrgicos	Artículos publicados antes del 2000
Estudios enfocados en valorización de residuos en la industria siderúrgica colombiana	Artículos que no tengan información completa.
Documentos en idioma inglés o español	Documento que estén en idiomas diferentes al inglés o español
Artículos que hayan sido publicados los últimos 20 años Artículos publicados en fuentes confiables	

Fuente: Autor

Búsqueda de artículos en bases de datos

Una vez que se ha delimitado el área de investigación y se han definido las preguntas de investigación, se avanza en la elaboración de una estrategia de búsqueda. Esta se desarrolla con la finalidad de recuperar información relevante y se pone en práctica en diversas plataformas de bases de datos, como Science Direct, Google Académico, Scopus, Springerlink y MDPI.

Tabla 3

Bases de datos

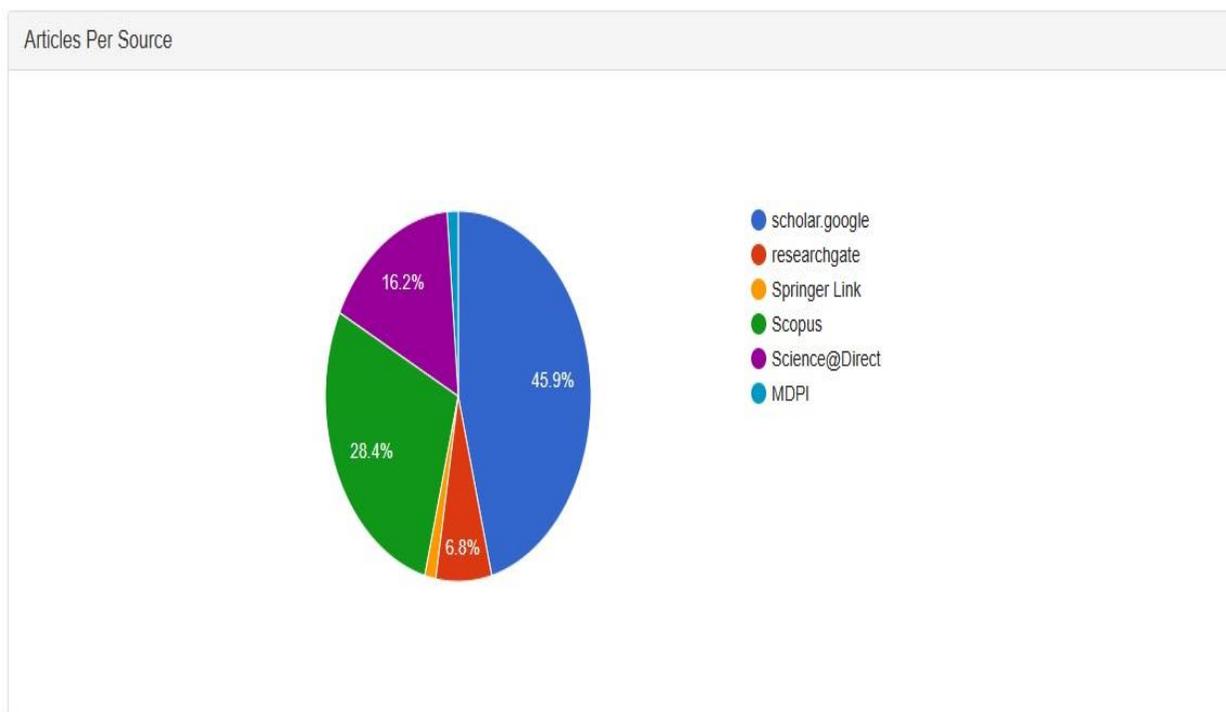
SCIENCE DIRECT	("residuos generados en la industria siderúrgica") AND ("Prácticas valorización de residuos")
GOOGLE ACADÉMICO	("Impacto ambiental" OR "eficiencia en el uso de recursos" OR "oportunidades económicas")
SCOPUS	("Residuos generados en la industria siderúrgica") AND ("Prácticas valorización de residuos") AND ("Impacto ambiental" OR "eficiencia en el uso de recursos" OR "oportunidades económicas")
SPRINGER LINK	("Eficiencia en el uso de recursos" OR "Reciclaje de subproductos") AND ("Residuos generados en la industria siderúrgica") AND ("Prácticas de valorización" OR "gestión sostenible")
MDPI	("Gestión sostenible" OR "prácticas ambientales") AND ("Residuos industriales siderúrgicos") AND ("Aprovechamiento de subproductos" OR "valorización de residuos")

Fuente: Autor

A través de las cadenas de búsqueda previamente diseñadas y aplicadas en cada una de las bases de datos, se logró identificar un conjunto total de 74 artículos. Posteriormente, estos artículos fueron sometidos al proceso de evaluación en el software Parsifal. Dicho proceso de evaluación se llevó a cabo de acuerdo con los criterios previamente establecidos, con el objetivo de determinar su relevancia y, en consecuencia, aprobar o rechazar su inclusión en el estudio.

Gráfica 2

Búsqueda bases de datos



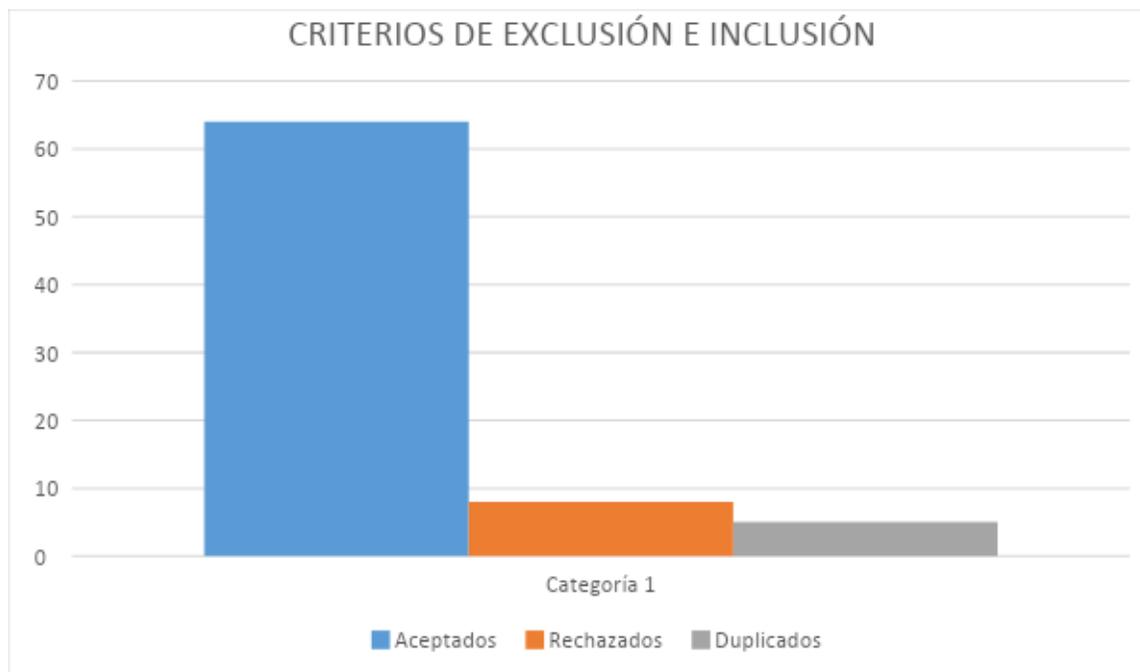
Fuente: Autor

Extracción de datos

Mediante las cadenas de búsqueda previamente formuladas y aplicadas en cada una de las bases de datos, se logró identificar un conjunto total de 74 artículos que posteriormente se sometieron al proceso de evaluación en el software Parsifal. Dicho proceso se llevó a cabo en conformidad con los criterios previamente establecidos, con el propósito de determinar su pertinencia y, en consecuencia, aprobar o rechazar su inclusión en el estudio como se muestra en la siguiente gráfica.

Gráfica 3

Criterios para la exclusión e inclusión



Fuente: Autor

Luego, tras eliminar los artículos duplicados y aquellos que no cumplían con los criterios de inclusión, se obtiene la siguiente muestra de estudio:

Tabla 4

Clasificación de los artículos

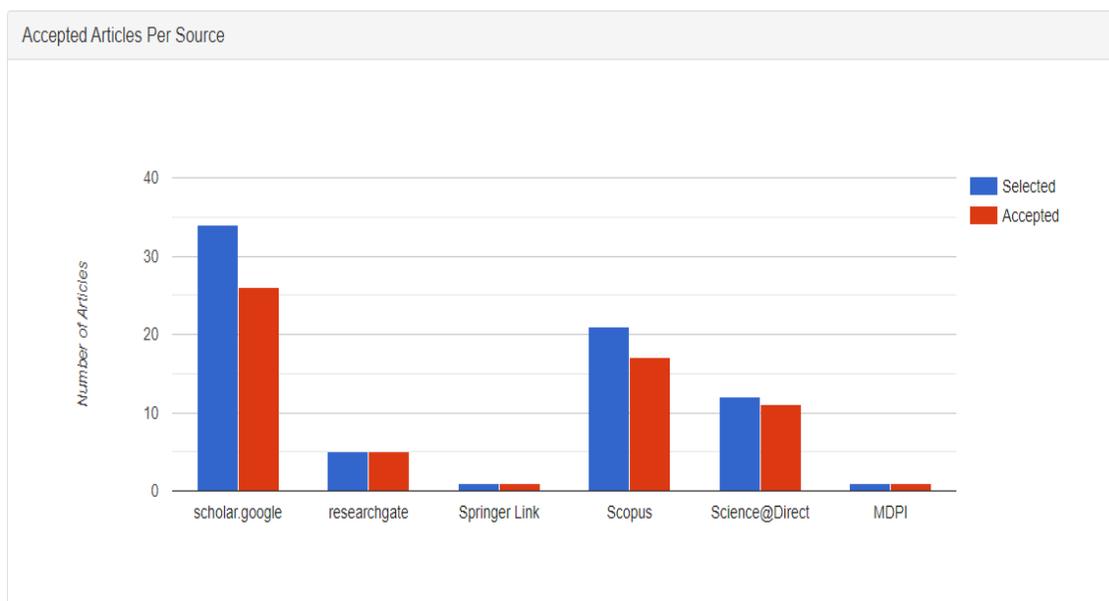
BASES DE DATOS	ACEPTADOS	RECHAZADOS	DUPLICADOS
Science Direct	11	1	0
Scopus	17	4	0
Springer Link	1	0	0

BASES DE DATOS	ACEPTADOS	RECHAZADOS	DUPLICADOS
Google Académico	26	3	5
Researchgate	5	0	0

Fuente: Autor

Gráfica 4

Clasificación de los artículos



Fuente: Autor

Con el fin de asegurar la obtención de información actualizada, se consideraron como límites de búsqueda los años de publicación comprendidos entre 2000 y 2023.

Análisis de los datos extraídos

A través del software Parsifal, se eligieron artículos de varias bases de datos, incluyendo Science Direct, Google Académico, Scopus, Springerlink y MDPI, utilizando como referencia información relevante relacionada con las prácticas de revalorización de residuos en la industria siderúrgica colombiana. Se aplicaron criterios de inclusión y exclusión para seleccionar los artículos pertinentes.

Para realizar la recopilación de información necesaria de manera eficiente, se emplearán ciertos elementos que facilitarán el proceso de análisis:

1) Caracterización de Residuos Siderúrgicos:

Caracterización detallada de los residuos siderúrgicos generados por la industria, teniendo en cuenta sus propiedades físicas, químicas y su cantidad.

2) Evaluación del Impacto Ambiental:

En base a investigaciones relacionadas con herramientas de evaluación del ciclo de vida (ACV) y análisis de impacto ambiental se quiere identificar el impacto ambiental de los procesos de valorización propuestos en comparación con la disposición tradicional.

3) Políticas y marco legal relacionados con la gestión de residuos siderúrgicos y la protección del medio ambiente:

Identificar qué políticas y regulaciones existentes a nivel local y nacional se enfocan en la gestión de residuos siderúrgicos y la protección del medio ambiente y como se han implementado y qué impacto han tenido en la reducción de la contaminación y la promoción de prácticas sostenibles en la industria siderúrgica.

4) Alternativas innovadoras para la valorización de residuos siderúrgicos:

Una vez analizados los datos y la información recopilada, se informan alternativas innovadoras y sostenibles para la valorización de los residuos siderúrgicos proporcionando ejemplos concretos y casos de éxito y cómo pueden implementarse en diferentes contextos industriales.

RESULTADOS

En el contexto de esta revisión bibliográfica centrada en la revalorización de los residuos generados en la industria siderúrgica colombiana, se han identificado varios descubrimientos de relevancia que resaltan la importancia de estas prácticas para la sostenibilidad y la gestión ambiental en el sector. Los resultados se estructuran en relación a los siguientes temas clave:

Tabla 5

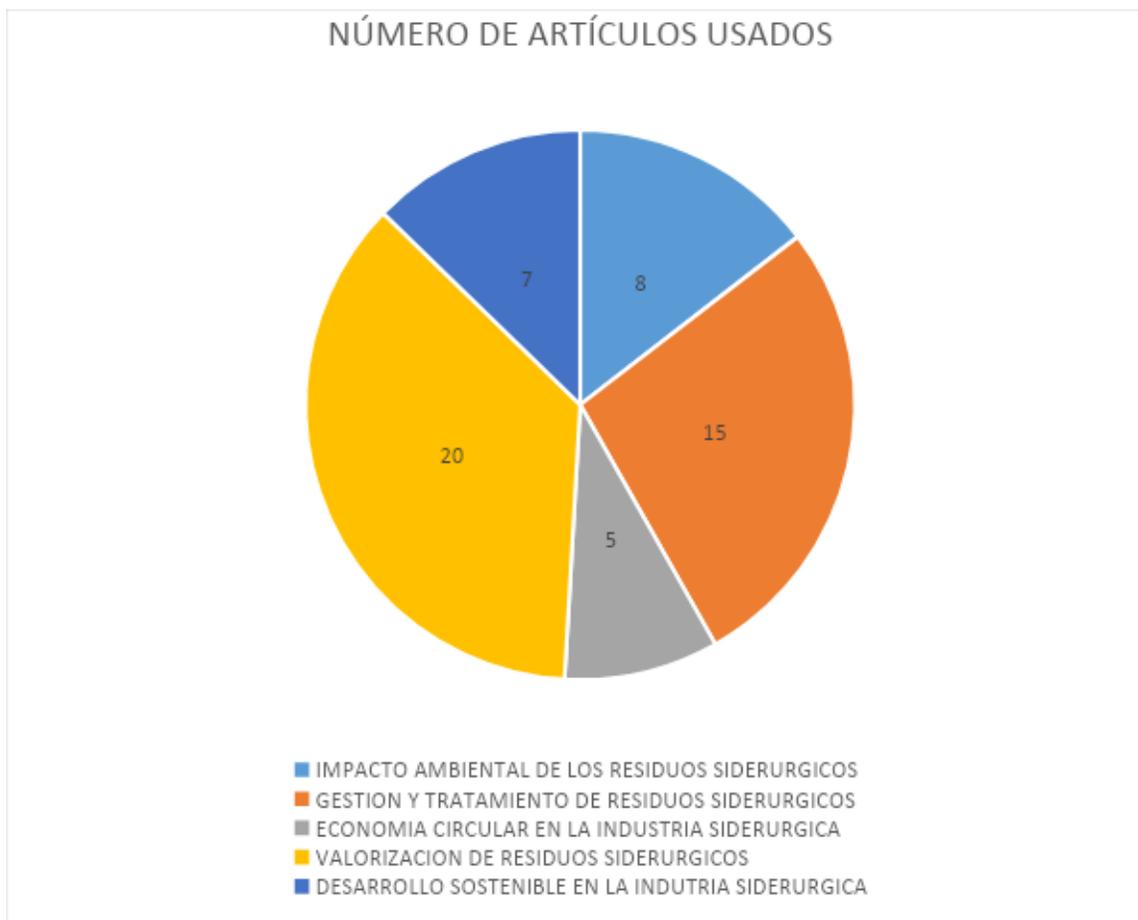
Temas Clasificados

ITEM	NÚMERO DE ARTÍCULOS UTILIZADOS EN CADA ITEM
IMPACTO AMBIENTAL DE LOS RESIDUOS SIDERÚRGICOS	8
GESTIÓN Y TRATAMIENTO DE RESIDUOS SIDERÚRGICOS	15
ECONOMÍA CIRCULAR EN LA INDUSTRIA SIDERÚRGICA	5
VALORIZACIÓN DE RESIDUOS SIDERÚRGICOS	20
DESARROLLO SOSTENIBLE EN LA INDUSTRIA SIDERÚRGICA	7

Fuente: Autor

Gráfica 5

Porcentaje de artículos utilizados



Fuente: Autor

IMPACTO AMBIENTAL DE LOS RESIDUOS SIDERÚRGICOS (8 ARTÍCULOS)

Los estudios revisados resaltaron el impacto significativo de los residuos siderúrgicos en el entorno ambiental. A través del análisis de artículos centrados en esta área, se encontró que las emisiones de gases de efecto invernadero, la contaminación del suelo y la acumulación de residuos sólidos son problemas ambientales comunes relacionados con la industria siderúrgica en Colombia. La mayoría de los artículos sugieren que la valorización de estos residuos puede ser una estrategia efectiva para reducir el impacto negativo en el medio ambiente.

GESTIÓN Y TRATAMIENTO DE RESIDUOS SIDERÚRGICOS (15 ARTÍCULOS)

La revisión bibliográfica resaltó distintas estrategias empleadas en la gestión y tratamiento de residuos siderúrgicos en la industria colombiana. Entre estas se incluyen la reintegración de escorias en proyectos de construcción, la conversión de residuos en materias primas secundarias y la aplicación de tecnologías avanzadas para la reducción y el tratamiento de desechos. Investigaciones anteriores indican que la implementación de enfoques idóneos en la gestión y tratamiento puede tener un impacto significativo en la reducción del impacto ambiental y en la mejora de la eficiencia en el uso de recursos.

ECONOMÍA CIRCULAR EN LA INDUSTRIA SIDERÚRGICA (5 ARTÍCULOS)

Un número limitado de artículos se centró en la economía circular en la industria siderúrgica. Estos análisis han destacado cómo la valorización de residuos puede integrarse en un marco de economía circular, cuya meta es maximizar la reutilización de materiales y reducir la generación de desechos. Aunque aún no se ha convertido en una corriente predominante en la industria, los resultados sugieren que la adopción de enfoques circulares puede generar un impacto positivo tanto en la sostenibilidad como en la eficiencia de los procesos.

VALORIZACIÓN DE RESIDUOS SIDERÚRGICOS (20 ARTÍCULOS)

La valorización de residuos siderúrgicos fue el tema más destacado en la revisión. Existen numerosos estudios sobre diversas prácticas de valorización, abarcando desde la utilización de escorias en proyectos de construcción hasta la obtención de materiales valiosos a partir de residuos, así como la integración de residuos en procesos de producción secundarios. Los resultados enfatizan la relevancia de estas prácticas, no solo en la reducción de desechos y la mitigación del impacto ambiental, sino también en la generación de oportunidades económicas.

DESARROLLO SOSTENIBLE EN LA INDUSTRIA SIDERÚRGICA (7 ARTÍCULOS)

La revisión de los artículos destacó la sostenibilidad como un tema de relevancia. Se examinaron diversas estrategias para la implementación de prácticas sostenibles en la industria siderúrgica colombiana, con un enfoque particular en la gestión de residuos. Los resultados señalan que la

valorización de residuos no solo contribuye a una gestión ambiental responsable, sino que también abre oportunidades económicas y mejora la eficiencia de los procesos, impulsando así una transformación positiva en la industria siderúrgica hacia un modelo más sostenible.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

CARACTERIZACIÓN RESIDUOS SIDERÚRGICOS

El procedimiento de gestión de los residuos industriales siderúrgicos se inicia con su caracterización, lo que a su vez simplifica la evaluación y la formulación de estrategias de tratamiento de manera más eficiente y simplificada. En la fabricación de acero son generados volúmenes significativos de residuos como resultado de las diversas etapas del proceso. Cada uno de estos desechos presenta características que los hacen adecuados para su aprovechamiento como subproductos, y exhiben diferencias tanto en términos químicos como físicos entre sí. Entre los desechos más comunes se encuentran las escorias de acería, que se originan en la fase final del proceso de fabricación (Parrón-Rubio, 2018).

La escoria de acería representa un importante subproducto que surge en el proceso de transformación del acero. De acuerdo con datos proporcionados por la Asociación Mundial del Acero, una siderúrgica de tipo integrada genera por cada tonelada de acero un 40% de escorias aproximadamente, mientras que en el caso de una acería semi integrada, la cantidad de escoria generada se reduce considerablemente a alrededor de 17% por tonelada de acero (World Steel Association, 2016).

En el contexto de la producción de acero en Colombia, predominan dos enfoques: uno implica el uso de altos hornos, donde el mineral de hierro es el componente primario, mientras que el segundo método involucra hornos de arco eléctrico que usan principalmente chatarra como materia prima, actualmente el Departamento de Boyacá cuenta con los 2 procesos (Orrego Santa, 2015)

Tabla 6

Generación estimada escorias en las principales siderúrgicas

COMPAÑÍA	PROCESO	PRODUCCIÓN ANUAL ESCORIA (t)
Acerías Paz del Rio S. A	Semi integral	44000
	Integral	70000
Gerdau Diaco S. A	Semi integral	98000

Fuente: (ANDI, 2022)

En Boyacá, se ha documentado que ciertas instalaciones, como la empresa Gerdau Diaco en Tuta, Boyacá, manifiestan una producción anual de escoria de 53,820 toneladas, resultado de la fabricación de aproximadamente 280,312.5 toneladas de acero crudo. Esto implica que en Colombia, exista un promedio cercano a los 192 kilogramos de escoria generados por cada tonelada de acero producido en las siderúrgicas de tipo semi integradas. Este valor resalta la relevancia de abordar la gestión de la escoria de acería en el país, con miras a optimizar la eficiencia del proceso y reducir al mínimo la producción de este subproducto (Sánchez, H. M. 2016). La recopilación exacta de los datos relativos a los volúmenes de producción de escoria en las instalaciones siderúrgicas colombianas no ha sido debidamente documentada. Por consiguiente, se ha procedido a calcular una aproximación de la producción de escoria de acería correspondiente a las principales empresas siderúrgicas en Colombia. Este cálculo ha sido efectuado en función de la producción de escoria observada en Gerdau Diaco, junto con la ponderación de la participación de cada entidad en el mercado del acero nacional. Este enfoque se basa en el principio de extrapolación y asume que la generación de escoria en otras siderúrgicas guarda similitudes proporcionales con la de Gerdau Diaco y la posición de cada empresa en el mercado del acero. Aunque es una estimación que conlleva cierta incertidumbre, es un primer paso significativo hacia la comprensión de la magnitud de este subproducto en la industria siderúrgica colombiana y la

posible identificación de áreas para su gestión y optimización (Santander & Mineroenergética, 2018)

Dado las considerables cantidades de escoria generadas, se vuelve imperativo llevar a cabo un proceso de tratamiento posterior con el propósito de mitigar su impacto ambiental y alinear la producción con los principios del desarrollo sostenible. Estos enfoques de administración de residuos, generalmente denominados con términos como recolección, recuperación, reutilización o valorización, engloban diversas acciones que deben aplicarse a las distintas corrientes de residuos con el fin de aprovechar parcial o integralmente el material, ya sea para su reincorporación en el mismo contexto de uso o para su aplicación en otros fines (Castells, 2000).

ESCORIAS

Las escorias son desechos que exhiben una condición "inerte," pudiendo manifestarse en estados sólidos o pastosos, y carecen de alteraciones sustanciales que los catalogaría como residuos peligrosos (RP). Estas escorias son el residuo principal en los procedimientos siderúrgicos, en la actualidad, la mayoría de las escorias generadas se manejan como un flujo residual, y una gran proporción de ellas se deposita en vertederos (Rubio, 2018).

Las escorias siderúrgicas exhiben una composición que está afectada por diversas variables de operación, no obstante, se pueden considerar los porcentajes presentados en la tabla que se muestra a continuación como una representación significativa:

Tabla 7

Composición característica escorias siderúrgicas

COMPONENTE	CONCENTRACIÓN (%)
MgO	5-9
FeO	5-22

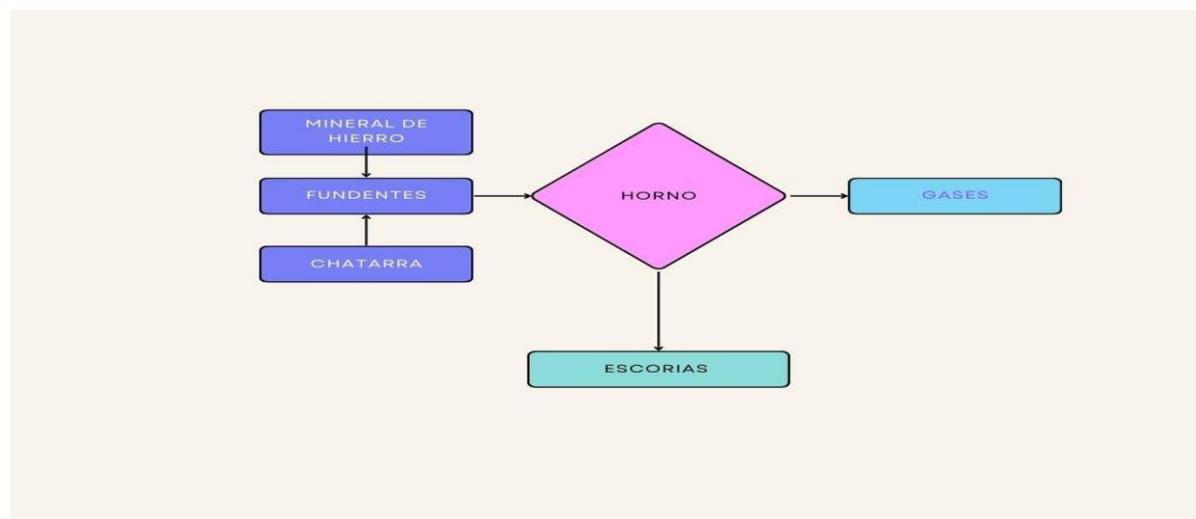
COMPONENTE	CONCENTRACIÓN (%)
CaO	25-33
SIO ₂	10-19

Fuente: (Monroy Cárdenas, 2009)

Las escorias, como residuos resultantes de la fase de producción de acero en la industria siderúrgica, están principalmente constituidas por óxidos, silicatos, sulfuros, aluminatos y fosfatos. La mayoría de las escorias producidas en otros países aparentan tener una composición que se asemeja, o está muy próxima, a este intervalo (Andrés Vizán et al., 2010).

Gráfica 6

Esquema básico generación de escoria



Fuente: Autor

Luego de la ejecución de procesos de filtración, agrupamiento, evaluación y otros procesos correlacionados, logra obtenerse un conjunto compuesto por cinco categorías de escoria. Estas resultan esenciales para comprender su comportamiento y poder establecer vínculos con las

posibles aplicaciones y llevar a cabo el correspondiente análisis, tanto desde una perspectiva técnica como medioambiental. Los grupos definidos quedan establecidos en la siguiente tabla:

Tabla 8

Caracterización de escorias

	MgO	FeO	CaO	SiO ₂
1	ALTO	ALTO	BAJO	ALTO
2	BAJO	ALTO	ALTO	BAJO
3	ALTO	BAJO	ALTO	ALTO
4	ALTO	BAJO	MEDIO	ALTO
5	ALTO	BAJO	ALTO	ALTO

Fuente: (Salazar Barco & Parra Giraldo, 2000)

Una vez han sido establecidas las categorías de escoria, es posible identificar las aplicaciones clave que podrían beneficiarse de la valorización de estas.

La investigación y aplicación de técnicas de valorización de las escorias siderúrgicas ha sido objeto de estudio y desarrollo durante los años recientes. Esta estrategia se respalda debido a la significativa relevancia de la producción de acero en la economía y las propiedades químicas y físicas inherentes a dichas escorias, se ha venido trabajando para rectificar la inapropiada categorización de estos coproductos como desechos, con el propósito de evidenciar que en verdad representan materiales altamente versátiles y de gran valor (Madías, J., 2015).

IMPACTO AMBIENTAL DE LOS RESIDUOS SIDERÚRGICOS

A medida que aumenta el grado de industrialización, la acumulación de desechos en ubicaciones de disposición definitiva se transforma en un aspecto problemático que prevalece en prácticamente todas las sociedades. Los sectores productivos se consideran como uno de los principales agentes contribuyentes a la degradación ambiental, dado su nivel de generación de impactos que inciden sobre el entorno natural. La magnitud de dichos impactos se encuentra primordialmente condicionada por las particularidades de las operaciones, productos y procesos que son generados o empleados por las empresas, además de su ubicación geográfica y la capacidad que posean para supervisar, reducir o prevenir los efectos adversos en el medio ambiente, lo cual refleja la calidad de su gestión ambiental (Hoof, Monroy & Saer, 2008).

Durante las operaciones relacionadas con el tratamiento de la escoria siderúrgica, surgen varios aspectos ambientales que impactan el entorno sujeto a intervención. En la contemporaneidad, la preponderante práctica de enviar la escoria producida a vertederos autorizados instaura una serie de efectos ambientales que adquieren relevancia como punto de referencia para evaluar los impactos derivados de sus potenciales aplicaciones alternas (Cadavid Marín, 2014).

Las bases de datos consignadas en IMPACT 2002 indican que los impactos primordiales resultantes de las escorias siderúrgicas se concentran en los siguientes aspectos:

- La presencia de sustancias perjudiciales para la salud, relacionadas con sustancias no carcinogénicas.
- La utilización de fuentes de energía no renovables.

Uno de los aspectos de gran relevancia es el transporte de la escoria hacia el depósito de residuos. En la mayoría de las situaciones, los vertederos suelen ubicarse en las cercanías de las instalaciones de producción de acero con el fin de minimizar este impacto. No obstante, es esencial considerar dicho impacto debido a la serie de actividades involucradas, que incluyen el consumo de combustible, la emisión de partículas durante el transporte y el desgaste de los vehículos en la carretera (Legret et al., 2008).

Además de estos aspectos, existen otros impactos, aunque su magnitud es menor en comparación con los previamente mencionados. Algunos de estos incluyen la ecotoxicidad y la generación de partículas que pueden causar problemas respiratorios, entre otros. Para evaluar los aspectos y los efectos ambientales relacionados con el manejo de la escoria negra, se ha desarrollado una matriz basada en la metodología de Leopold, la cual fue creada por la empresa Diaco en Tuta, Boyacá. En esta matriz, se han identificado los aspectos medioambientales vinculados a las operaciones de procesamiento de las escorias. La calificación de estos aspectos se ha realizado tanto de forma cuantitativa, teniendo en cuenta factores como la frecuencia, gravedad y extensión de los eventos, como de forma cualitativa, considerando el tipo de incidente, el período de manifestación del evento y la situación resultante. Se han establecido criterios específicos y correlaciones apropiadas para calificar cada uno de estos aspectos (Parra Araque & Sánchez García, 2010).

A continuación, se presenta un ejemplo de la estructura de la matriz utilizada para identificar los aspectos y las consecuencias ambientales relacionadas con las operaciones de procesamiento de la escoria de acería en las instalaciones de Siderúrgica Diaco, planta Tuta

Tabla 9

Estructura Matriz Leopold evaluación ambiental de impactos ambientales por gestión de escoria

ASPECTOS E IMPACTOS							CRITERIO DE EVALUACIÓN				
Ítem	Área/Actividad	Aspecto Ambiental	Impacto Ambiental	Incidencia	Temporalidad	Situación	Frecuencia	Gravedad	Extensión	Resultado	Significancia
1.	Vaciado de escorias del horno	Emisión de partículas	Contaminación atmosférica	D	A	N	5	1	1	47	N

ASPECTOS E IMPACTOS							CRITERIO DE EVALUACIÓN				
Ítem	Área/Actividad	Aspecto Ambiental	Impacto Ambiental	Incidencia	Temporalidad	Situación	Frecuencia	Gravedad	Extensión	Resultado	Significancia
		Escoria sobre el suelo	Contaminación del suelo	D	A	N	5	3	1	60	S
2.	Almacenamiento temporal	Emisión material particulado	Contaminación atmosférica	D	A	N	5	3	1	60	S
		Escoria sobre el suelo	Contaminación del suelo	D	A	N	5	3	1	60	S
		Arrastre del material por precipitación	Contaminación del suelo	D	A	N	5	3	1	60	S

Fuente: Diaco S.A

Este procedimiento se llevó a cabo para cada una de las actividades o secciones relacionadas con el tratamiento de la escoria. Tras la revisión, se determinó que el criterio de evaluación que tiene

el impacto más significativo es la frecuencia de las operaciones, dado que estas se realizan de manera constante y regular, lo que da lugar a una afectación constante de los recursos naturales. Según la evaluación de los efectos, se observa que la actividad que genera el impacto negativo más significativo es el transporte de las escorias desde su lugar de origen hasta el área de almacenamiento temporal en el patio de coproductos. A diferencia de otras actividades, esta operación no ocurre en un lugar concreto y definido, sino que involucra el traslado de material entre distintos puntos de las instalaciones de la planta, lo que resulta en un impacto que se extiende a una zona más amplia. Las operaciones de almacenamiento, tanto de escorias sin procesar como de aquellas ya tratadas, representan un impacto negativo importante debido a que requieren una extensa área de terreno, lo que afecta negativamente el recurso suelo. Además, de acuerdo con las condiciones de almacenamiento, el material se encuentra expuesto a los elementos climáticos de la región, lo que ocasiona eventos frecuentes de arrastre por corrientes de viento y agua (Parra Araque, 2010).

En lo que respecta a la gravedad de los impactos generados por estas actividades, se clasifican generalmente como bajos o medios, ya que sus efectos no provocan alteraciones significativas y pueden controlarse mediante medidas inmediatas, sin causar daños permanentes o irreversibles a los recursos naturales (Díaz Guevara, 2021)

VALORIZACIÓN ESCORIAS SIDERÚRGICAS

Actualmente, numerosos proyectos de investigación están en curso, orientados hacia la consecución de un aprovechamiento efectivo de estas escorias. Mediante una serie de análisis previos, se han discernido las limitaciones primordiales inherentes a la inclusión de la escoria en los distintos procedimientos industriales (Perrotta et al., 2011).

El departamento de Boyacá, debido a sus características geológicas, presenta un potencial significativo en el contexto del desarrollo de capacidades en la industria siderúrgica. No obstante, es relevante resaltar que también es el segundo departamento más afectado por la contaminación en Colombia. Se enfatiza la relevancia de la producción de escorias tanto a nivel nacional como en el departamento de Boyacá. Empresas como PAZ DEL RÍO, DIACO y SIDENAL, todas ellas ubicadas en Boyacá, generan considerables cantidades de acero, alcanzando cifras de producción de 450,000, 580,000 y 200,000 toneladas, respectivamente. Esto subraya la necesidad de proponer

estrategias encaminadas a la gestión adecuada y sostenible de los residuos generados por la industria siderúrgica, con el potencial de aprovecharlos en el sector de la construcción (Sánchez, 2014). Se ha constatado en el departamento de Boyacá un total de 200 empresas que mantienen algún tipo de vínculo con el sector siderúrgico y, por consiguiente, con los desechos que esta actividad genera. Estas empresas se distribuyen en un total de 20 municipios que se encuentran en la región central del departamento (El Economista, 2020).

En este contexto en lugar de la disposición convencional en vertederos, hay algunas opciones de valorización como alternativas y se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 10

Potenciales de valorización de escorias

ÁREA	CARACTERÍSTICAS	GRUPO
Industria cerámica	La escoria se puede emplear en la fabricación de ladrillos refractarios. No obstante, es fundamental considerar que su contenido de cal puede generar eflorescencias como único inconveniente.	1
Producción Clinker	Dadas sus características químicas, la escoria resulta atractiva para la fabricación de Clinker.	3
Industria el hormigón	La escoria puede utilizarse como árido en diversas aplicaciones, lo que disminuye la proporción de árido natural requerido en la	4-5

ÁREA	CARACTERÍSTICAS	GRUPO
	edificación de estructuras de hormigón a gran escala.	
Construcción de carreteras	La escoria se utiliza como árido, lo que reduce la necesidad de árido natural. Este enfoque es especialmente beneficioso en proyectos de gran envergadura que requieren volúmenes significativos de materias primas.	4-5

Fuente: Autor

Tras el análisis se identificaron algunos casos en Colombia los cuales resaltan el gran desarrollo de estas técnicas de valorización en la industria siderúrgica, las cuales promueven una producción sostenible contribuyendo así al establecimiento de una economía circular (Sánchez, 2016).

En el año 2003, en Colombia, se llevó a cabo un proyecto titulado "Impacto del desperdicio de una planta siderúrgica en las propiedades de las bases y subbases granulares". Este estudio se centró en explorar enfoques para mejorar las propiedades de las bases y subbases granulares, que se definen según las normativas del INVIAS. El proyecto demostró que los residuos generados en el alto horno de la compañía Siderúrgica de Boyacá tuvieron un efecto positivo al aumentar tanto la densidad seca como la resistencia de las bases y subbases granulares. Además, a través de pruebas de laboratorio realizadas en la Universidad Militar, se estableció que, al modificar los materiales con diferentes tamaños de partículas, evaluados mediante tamices de 10, 40, 200 y tamiz de fondo, se lograron mejoras significativas (Reyes Ortiz & Camacho Tauta, 2023)

En el año 2010, se realizó una investigación en la compañía siderúrgica DIACO, ubicada en el municipio de Tuta, Boyacá. Este estudio se enfocó en la evaluación de las características físicas y mecánicas de dos variantes de escoria con el propósito de utilizarlas como agregado grueso en mezclas de concreto. Se identificó que los límites de granulometría establecidos por la NTC 174 para la escoria gruesa se asemejan a una granulometría ideal, lo que mejora las cualidades del concreto en comparación con la escoria fina. En lo que respecta al peso específico de la escoria fina, su uso se restringe debido a que incrementa significativamente la densidad del concreto, lo que lo hace inapropiado para aplicaciones en estructuras de gran altura. Por otra parte, la escoria gruesa exhibe un desgaste del 16%, lo cual es bajo en comparación con el agregado grueso convencional, que generalmente presenta tasas de desgaste que oscilan entre el 30% y el 50%. Esto convierte a la escoria gruesa en un material altamente recomendable para su utilización en proyectos que requieren una alta resistencia a la abrasión, como pisos, carreteras, aceras y estructuras expuestas a condiciones de erosión climática (Parra Araque & Sánchez García, 2010).

El equipo de investigación INME ejecutó un proyecto denominado "Utilización de Escoria como Agregado para el Concreto: Una Solución Integral", que ocurrió en 2 etapas. En la primera etapa, procediendo con la caracterización minuciosa de la escoria, lo que permitió la formulación precisa de la materia inicial y la combinación, así como la determinación de las proporciones óptimas a emplear en los componentes o agregados. Además, esta fase posibilitó la caracterización completa del concreto resultante desde diversas perspectivas. En la segunda etapa, se lograron proponer elementos específicos para su uso en la construcción, tales como adoquines, tabletas y ladrillos (INME, 2012).

Como resultado principal, se obtuvo una exhaustiva caracterización de las propiedades físico-mecánicas del concreto elaborado con escoria de horno, el cual fue utilizado como reemplazo del agregado fino (arena) en diversas proporciones: 0%, 10%, 15% y 20%. Estas investigaciones han posibilitado la realización de ensayos y pruebas especializadas, abarcando aspectos como la resistencia a la compresión, el módulo de rotura, la absorción, el módulo de elasticidad y la densidad del material endurecido, aplicados a distintas resistencias de diseño. También, se llevaron a cabo pruebas específicas para la elaboración de un concreto de peso ligero, que requiere dosificaciones proporcionales y para un concreto que cumple con propiedades acústicas y estructurales (Santander, 2012)

En el año 2016, durante el marco del V Congreso Internacional de Ingeniería Civil, que tuvo lugar en la Universidad Santo Tomás Seccional Tunja, se presentó el proyecto titulado "Revisión Integral de las Escorias de Horno de Arco Eléctrico y sus Potenciales Aplicaciones en Infraestructura Vial". Este proyecto se enfocó en explorar tres opciones factibles para la utilización de estos subproductos. La primera alternativa consideró la contribución de las escorias negras de horno de arco eléctrico en la industria del cemento, específicamente en la fabricación del Clinker, como una fuente de aporte de hierro. La segunda alternativa se centró en su aplicación en capas de rodadura, donde la escoria formaría parte de la composición del ligante bituminoso utilizado en las capas asfálticas de carreteras. La tercera opción exploró el empleo de estas escorias en la construcción de terraplenes, bases y subbases de carreteras, lo que abarcaría el relleno de terrenos y la restauración de áreas degradadas (Sánchez, 2016).

El proyecto de investigación titulado "Utilización de residuos siderúrgicos para diseño y dosificación de diferentes tipos de material cementante en estructuras sostenibles," realizado en 2019, se enfoca en analizar la viabilidad técnica de reemplazar el cemento convencional con desechos de la siderurgia, específicamente la escoria, en la producción de hormigón y lechada cementosa. Esta investigación implica un análisis minucioso de las propiedades mecánicas y de resistencia del producto final, tomando en consideración las características particulares de la escoria utilizada y su proporción en la mezcla. Luego de realizar una serie de pruebas con tres tipos distintos de escoria, se llegó a la conclusión de que las escorias generadas en el alto horno son idóneas y recomendables para la elaboración de lechada sostenible, así como para servir como sustituto del cemento. Los resultados obtenidos indican mejoras significativas en las propiedades de estos materiales en comparación con otros dos tipos de mezclas que involucran escorias de arco eléctrico. Estas últimas se consideran adecuadas para lechadas con requerimientos mecánicos menores, como las empleadas en trabajos de albañilería, y podrían contribuir a la conservación de recursos naturales al utilizarse en aplicaciones no estructurales (Pérez, 2019).

CASOS DE ÉXITO EN EL DEPARTAMENTO DE BOYACÁ

Es esencial resaltar que el sector de la construcción civil y vial experimenta un crecimiento constante y una creciente demanda de considerables cantidades de materiales para satisfacer sus necesidades, sin plena consideración de los impactos ambientales asociados a estas actividades.

En este contexto, la utilización de escorias negras como agregado en concreto y asfalto, así como de escorias blancas en la mejora de suelos, se perfilan como alternativas para mitigar el deterioro causado por la actividad minera y fomentar el mercado de residuos industriales (Kiamaris Gorrín, et al., 2022).

En Boyacá, se han obtenido resultados prometedores en ciertos procesos de valorización, donde se han empleado agregados siderúrgicos para diversas actividades. Estos resultados favorables han alcanzado tal magnitud que se considera a las escorias procesadas coproductos (Orduz & Ruiz, 2021). En las instalaciones de la planta de Diaco S.A. En Tuta, se ha establecido una sección dedicada a la gestión de subproductos. En sus operaciones, el enfoque principal se concentra en el desarrollo de proyectos de elementos prefabricados que incorporan agregados siderúrgicos, específicamente escorias previamente procesadas, en lugar de materiales pétreos convencionales. Esta iniciativa involucra la gestión de diversas escorias, que se dirigen al área de subproductos. La asignación final de estos residuos ya sea como destino definitivo o para su posible aprovechamiento, depende de su naturaleza, clasificación y el impacto ambiental previsible asociado (Gerdau Diaco, 2018). La gestión de esta sección comprende una serie de actividades:

- El transporte, la descarga y almacenamiento de los coproductos.
- El procesamiento interno de los coproductos.
- El procesamiento externo de los coproductos.
- La determinación del destino de los coproductos.

Este proyecto, además de beneficiar a la empresa DIACO S.A., tiene un impacto en el sector de la construcción. Estos elementos tienen la perspectiva de introducirse en el mercado con costos reducidos y propiedades mecánicas que cumplen con las normativas técnicas pertinentes para cada producto. Los agregados siderúrgicos, en calidad de materiales de construcción, se usan en diversas aplicaciones internas. Esto incluye su uso en la confección de placas de piso destinadas a varias áreas de la planta (Díaz Guevara, F. C. 2021).

Dentro de los elementos que ya se desarrollan dentro del área de coproductos, se encuentran:

Gráfica 7

Adoquín peatonal/estructural



Fuente: (Díaz, F. C. 2021)

Gráfica 8

Bloque estructural



Fuente: (Díaz, F. C. 2021)

Gráfica 9

Bordillo A85- Bordillo A80



Fuente: (Díaz, F. C. 2021)

Gráfica 10

Maceta piramidal



Fuente: (Díaz, F. C. 2021)

Como segundo caso identificado la acería Paz del Río actualmente ha realizado una detallada identificación de los subproductos de relevancia que pueden ser objeto de valorización, así como las estrategias de disposición final pertinentes para estos subproductos. Este análisis y clasificación se enmarca en la necesidad imperante de llevar a cabo un seguimiento exhaustivo y un monitoreo riguroso en consonancia con su política ambiental. Dentro de los subproductos que han sido identificados como susceptibles de ser valorizados se encuentran aquellos que poseen una fuente de generación específica, y se han evaluado las opciones más adecuadas para su disposición final. Este proceso de clasificación y evaluación representa un pilar fundamental en el compromiso de la acería Paz del Río con la gestión ambiental sostenible y eficiente (Ucrós, 2009).

Tabla 11

Residuos acerías paz del rio S.A

ÁREA GENERACIÓN	SUBPRODUCTO	PROCESO VALORIZACIÓN
Alto horno	Escoria	Materia prima para producción de cemento, bloques, adoquines
Convertidores	Escoria	Producción de abono fosfórico

Fuente: Autor

De acuerdo con el reporte integrado de sostenibilidad de la empresa publicado en el año 2020 se ha alcanzado la validación exitosa, a una escala industrial, de una tecnología innovadora que habilita a la empresa para la producción de cementos híbridos. Esta tecnología permite reemplazar Clinker en una proporción significativa, de hasta un 30%, con escorias. Este logro no solo conlleva beneficios ambientales sustanciales, sino que también amplía la disponibilidad de productos para su exportación. Actualmente se están desarrollando rigurosas pruebas con el objetivo de asegurar que el producto se ajuste de manera precisa a los requerimientos específicos. Este avance representa un hito significativo en el fortalecimiento de las operaciones y en el cumplimiento de las metas de sostenibilidad ambiental y eficiencia productiva (Argos, 2020). El cemento verde o híbrido es el proyecto de mayor relevancia que se está trabajando actualmente en esta empresa, se trata de un cemento altamente especializado, meticulosamente concebido para ser empleado en los procesos de producción industrializada de concreto. Este cemento posee una serie de atributos que redundan en una significativa optimización del desempeño, alentando una eficiencia superior (Universidad EAFIT, 2017)

Además, se caracteriza por generar notables incrementos en los niveles de resistencia tanto en edades tempranas como en las etapas finales del proceso. Este producto representa un avance trascendental en la búsqueda de materiales de construcción sostenibles que sean capaces de elevar los estándares de eficacia y calidad en la industria del concreto (Argos, 2023).

Tabla 12

Usos escoria en Acerías Paz del Río S.A

ELEMENTO	CO PRODUCTO	USO	BENEFICIOS
Cemento uso general (reducción superior al 35%)	Adicionado con escorias y fabricado en la planta de Sogamoso	Preparación de morteros para pisos, nivelación, lechadas y rellenos. Fabricación de elementos prefabricados en tamaños pequeños y medianos. Elaboración de	Facilita la preparación de una mezcla manejable, uniforme y con buenas propiedades de trabajabilidad.
Cemento estructural Max (reducción superior al 13%)	Adicionado con escorias y fabricado en la planta de Sogamoso	morteros para construcción de mampostería, adherencia de cerámica, revestimientos, capas finales y se utilizan en la fabricación de una amplia variedad de elementos de concreto.	Cuando se incorpora en mezclas de concreto, proporciona una adecuada consistencia y promueve una excelente adherencia.

Fuente: Autor

Es relevante destacar que Paz del Río S.A. ha implementado un plan de gestión de residuos que ha arrojado resultados altamente positivos. Como parte de esta iniciativa, se ha logrado reducir significativamente la generación de residuos convencionales destinados a ser dispuestos en rellenos sanitarios, con una disminución sustancial del 36%. Paralelamente, se ha obtenido un aprovechamiento extremadamente efectivo de los residuos no peligrosos, alcanzando una tasa de aprovechamiento del 80%. Estos logros son testimonio del firme compromiso de la empresa con la sostenibilidad y la reducción de su impacto ambiental (Informe Anual Argos, 2017).

Las acerías, en su conjunto, tienen la capacidad para manejar internamente una parte significativa de los residuos que se originan en su proceso de producción. Sin embargo, algunos subproductos, como las escorias, pueden encontrar aplicaciones más efectivas fuera de sus instalaciones. Es en este contexto que las industrias cerámicas y las cementeras han surgido como las principales receptoras de estos residuos. En el contexto colombiano, se ha identificado que las cementeras ostentan un potencial considerable para la utilización y aprovechamiento de la mayoría de los residuos siderúrgicos actuales. Este potencial se basa en su cercanía a las instalaciones siderúrgicas, su capacidad de procesamiento sólida y su continua evolución tecnológica. De hecho, las plantas de concreto desempeñan un papel esencial al integrar desechos como escorias, cascarilla de laminación y virutas de mecanizado en sus operaciones de producción (UPME, 2018).

La valorización de escorias surge como una alternativa efectiva para mitigar los efectos adversos de la actividad siderúrgica en el departamento y para impulsar el mercado de residuos industriales. Este enfoque se fortalece gracias a la creación de este tipo de áreas especializadas, que se centran en la gestión de coproductos. Estos logros en Boyacá reflejan un enfoque innovador y sostenible hacia la gestión de residuos y el desarrollo de nuevos materiales para la industria de la construcción, destacando el potencial de la región en este campo (Orduz Pérez & Ruiz García, 2021).

IMPACTO ECONÓMICO Y AMBIENTAL

Después de un análisis específico sobre casos de éxito de valorización de la escoria siderúrgica en los sectores de la construcción principalmente, es fundamental subrayar los beneficios holísticos que esta práctica aporta a los cuatro pilares fundamentales para lograr una transición exitosa hacia un desarrollo sostenible (Astorgano, 2020).

Entorno medioambiental

- Optimización de la utilización de materias primas naturales, lo que conlleva a una prolongación significativa de la durabilidad de estos recursos.
- Drástica reducción de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂).

- Notable mitigación del impacto visual, ambiental y ecológico que suele estar vinculado a los vertederos, generando así un entorno más sostenible y agradable.
- Significativa disminución de las emisiones asociadas al proceso de extracción y acondicionamiento de dichas materias primas.

Gestión Administrativa

- Facilita el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible promoviendo la economía circular y la disminución de las huellas medioambientales.
- Estimula la preservación financiera al considerar los gastos a lo largo del ciclo de vida.
- Refina la percepción pública y se erige como un paradigma de buenas prácticas para el ámbito empresarial.
- Disminución de los desembolsos asociados a depósitos de desechos y supervisión de su empleo.

Tejido empresarial

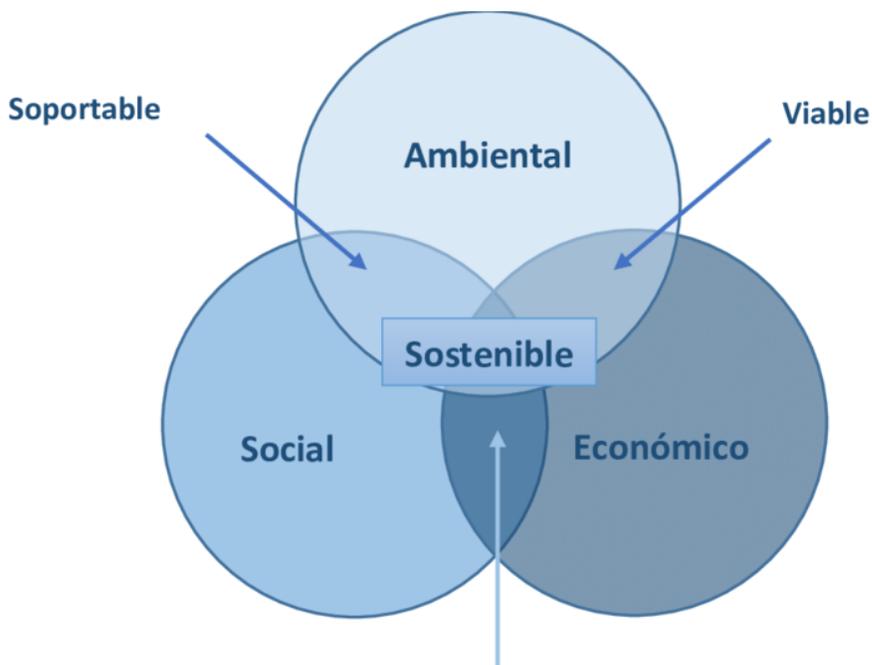
- Proporciona estímulos a las empresas con el propósito de fomentar la innovación y potenciar su competitividad.
- Fortalece la economía regional al mismo tiempo que instituye criterios medioambientales para los productos y servicios.
- Estimula la investigación de productos y servicios innovadores.
- Promueve el surgimiento de nuevas áreas comerciales.
- Facilita la utilización de una materia prima novedosa, de bajo costo y alto rendimiento, en una variedad de sectores, como la construcción, la industria cementera, entre otros.

Sociedad

- Disminuye el coste de bienes y tecnologías orientados al ámbito ambiental.
- Eleva la calidad de vida mediante la disminución de repercusiones medioambientales, especialmente en las inmediaciones de los depósitos de residuos y de las empresas siderúrgicas.
- Forja un vínculo entre la empresa emergente y el modelo a seguir, intensificando la sensibilización en torno a asuntos ecológicos.
- Estimula las tácticas de economía circular, en las que los desechos son reaprovechados en otras aplicaciones.
- Facilita la creación de nuevos puestos de trabajo.

Gráfica 11

Pilares de desarrollo sostenible



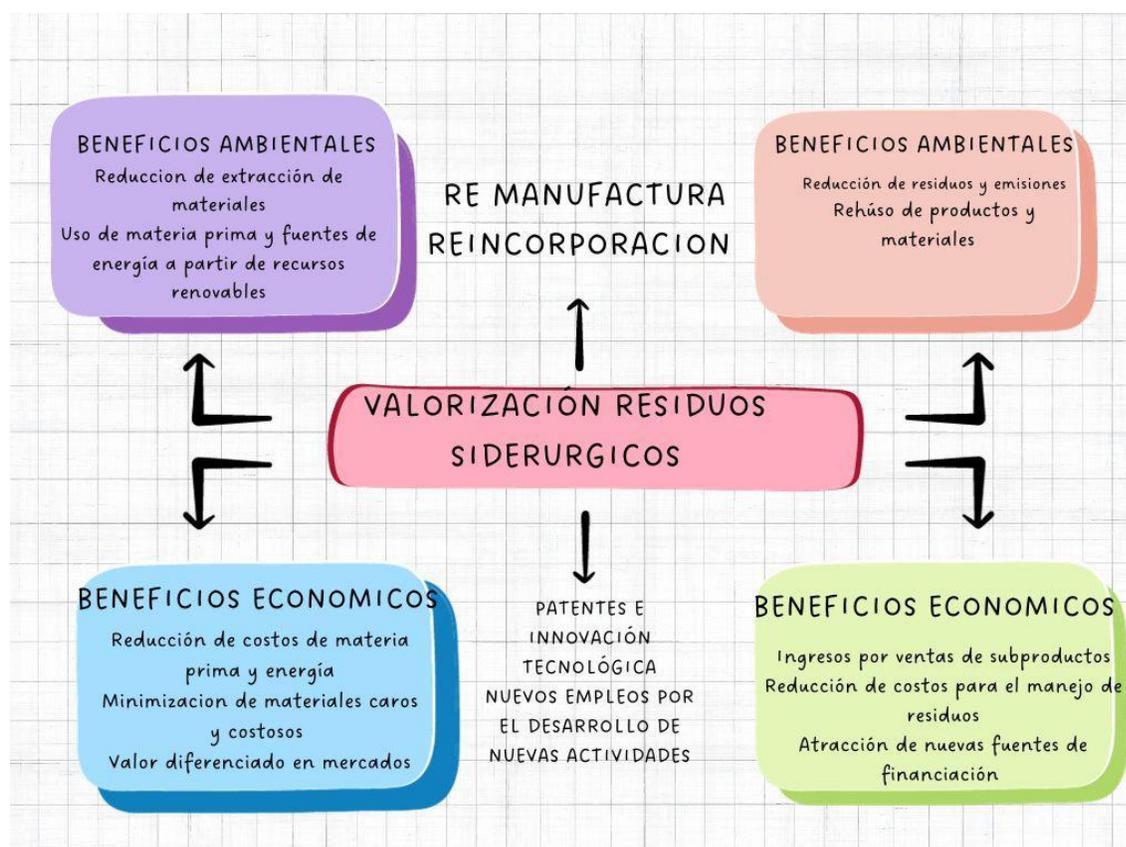
Fuente: (Naciones Unidas. 2023)

La adopción del concepto de economía circular conlleva una serie de beneficios en diversos sectores, según lo indicado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible junto con el

Ministerio de Turismo, Industria y Comercio. Este enfoque impulsa la eficiencia en la utilización de recursos al optimizar tanto la entrada, reduciendo el consumo inicial, como la salida, minimizando la disposición de productos al final del ciclo de producción. Además, la reutilización de estas escorias genera un valor añadido, al tiempo que facilita la apertura de nuevos mercados que demandan prácticas ambientalmente sostenibles y socialmente responsables (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible 2019).

Gráfica 12

Beneficios Economía circular



Fuente: Autor

Las técnicas de valorización permiten impulsar el desarrollo sostenible considerando la conexión entre el entorno, la comunidad y la economía, los cimientos básicos de la sostenibilidad. La importancia de este estudio radica en contribuir al avance sostenible en la industria siderúrgica y fomentar prácticas de valorización, progresando en tres de los Objetivos de Desarrollo Sostenible establecidos en la agenda 2030 (ONU, 2015).

Objetivo 9: Industria, Innovación e Infraestructura

Objetivo 11: Ciudades y Comunidades Sostenibles

Objetivo 12: Producción y Consumo Responsable

CONCLUSIONES

En el transcurso de esta investigación, se ha explorado el potencial de la valorización de escorias siderúrgicas en diversas industrias, destacando su contribución a la economía circular y su impacto ambiental positivo. Los hallazgos han conducido a algunas conclusiones cruciales que no sólo impulsarán el campo de la gestión de residuos, sino que también influirán en la innovación empresarial y la sostenibilidad ambiental.

A continuación, se presentan algunas conclusiones fundamentales que surgieron de este estudio:

1. Este estudio ha demostrado que la valorización de escorias siderúrgicas en la construcción y otras industrias puede fomentar la economía circular, reduciendo la dependencia de materias primas naturales y disminuyendo las emisiones de CO₂.
2. Al reemplazar materiales convencionales con escorias, se logra una drástica reducción de emisiones de CO₂ y una significativa disminución del impacto visual, ambiental y ecológico asociado a los vertederos, lo que contribuye a un entorno más sostenible y agradable.
3. La gestión de coproductos, como las escorias, se presenta como un paradigma de buenas prácticas en la gestión de residuos, disminuyendo los costos asociados a depósitos de desechos y supervisión de su empleo.
4. La investigación fomenta la innovación y la competitividad en las empresas, especialmente en la industria de la construcción, promoviendo el desarrollo de nuevos materiales y productos.

CONTRIBUCIONES DE LA INVESTIGACIÓN

1. **Promoción de la Economía Circular:** La valorización de escorias siderúrgicas ha demostrado ser una estrategia efectiva para fomentar la economía circular al reducir la demanda

de materias primas naturales. Esta práctica ofrece una alternativa viable y sostenible que puede ser adoptada por diversas industrias.

2. Reducción de emisiones de CO₂: La utilización de escorias como materia prima ha demostrado reducir las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) en comparación con métodos tradicionales de disposición en vertederos. Esta contribución es fundamental en la lucha contra el cambio climático y la conservación del medio ambiente.

3. Modelo de Buenas Prácticas: La gestión de coproductos, como las escorias, ha surgido como un modelo de buenas prácticas en la gestión de residuos industriales. Este enfoque no solo conlleva beneficios ambientales y financieros, sino que también establece un referente valioso para la gestión empresarial.

4. Estímulo a la Innovación Empresarial: La investigación resalta cómo la valorización de escorias impulsa la innovación empresarial al fomentar el desarrollo de nuevos materiales y productos en diversas industrias, lo que aumenta la competitividad y la diversificación de ofertas.

RECOMENDACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

1. Aplicación a Nivel Nacional: Se recomienda que el enfoque de valorización de escorias sea promovido y aplicado a nivel nacional en Colombia. Esto podría incluir incentivos y regulaciones para impulsar la adopción de estas prácticas en diversas industrias.

2. Investigación Continua: Se insta a la comunidad científica y empresarial a continuar investigando y desarrollando nuevas aplicaciones para las escorias siderúrgicas. Esto podría involucrar la búsqueda de métodos más eficientes y sostenibles de valorización.

3. Educación y Sensibilización: La creación de programas de educación y sensibilización es esencial para informar a la sociedad sobre los beneficios de la economía circular y la valorización de residuos. Esto fomentaría una mayor adhesión a estas prácticas.

4. Colaboración Intersectorial: Se sugiere promover la colaboración entre sectores, como la industria siderúrgica, cementera y de la construcción, para maximizar la eficiencia y el potencial de valorización de escorias.

REFERENCIAS

- Akinwumi, I. (2014). Soil modification by the application of steel slag. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 58(4), 371-377
- Allaica, J. C. M. (2018). La ecología industrial y la economía circular. Retos actuales al desarrollo de industrias básicas en el Ecuador. *Dilemas Contemporáneos: Educación, Política y Valores*
- Alonso Díez, Á. (2021). Prefabricados ecológicos de mortero de yeso diseñados con escorias de acería
- Andrés Vizán, S., Huerta Martínez, G., Llera Traviesa, R., & Luiña Fernández, R. (2010). Valoración tecno-ambiental de las escorias de acería ld mediante análisis dinámico de ciclo de vida
- Bharani, S., Rameshkumar, G., Manikandan, J., Balayogi, T., Gokul, M., & Bhuvanesh, D. C. (2021). Experimental investigation on partial replacement of steel slag and E-waste as fine and coarse aggregate. *Materials Today: Proceedings*, 37, 3534-3537
- Cadavid Marín, G. H. (2014). Análisis de ciclo de vida (ACV) del proceso siderúrgico (Doctoral dissertation).
- Castells, X. E. (2000). *Reciclaje de residuos industriales: aplicación a la fabricación de materiales para la construcción*. Ediciones Díaz de Santos
- Castells, X. E. (2012). *Valoración de residuos procedentes de grandes industrias: Reciclaje de residuos industriales*. Ediciones Díaz de Santos
- Dhara, S., Kumar, S., & Roy, B. C. (2015). Management of solid waste for sustainability of steel industry. *HCTL Open Int J Technol Innov Res (IJTIR)*, 16, 01-06
- Dhoble, Y. N., & Ahmed, S. (2018). Review on the innovative uses of steel slag for waste minimization. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 20, 1373-1382

- Díaz Piloñeta, M., Terrados Cristos, M., Alonso Iglesias, G., & Álvarez Cabal, J. V. (2021). Environmental assessment of the use of steel slag in shot blasting by lca [valoración ambiental de la aplicación de residuos siderúrgicos en granallado]. Proceedings From The International congress on Project Management and Engineering
- Díaz Piloñeta, M. (2022). Valorización de escorias de acería en aplicaciones no estructurales en el marco de la economía circular
- Fakhri, M., & Ahmadi, A. (2017). Recycling of RAP and steel slag aggregates into the warm mix asphalt: A performance evaluation. *Construction and Building Materials*, 147, 630-638
- Falsafi, M., Terkaj, W., Guzzon, M., Malfa, E., Fornasiero, R., & Tolio, T. (2023). Assessment of valorisation opportunities for secondary metallurgy slag through multi-criteria decision making. *Journal of Cleaner Production*, 402, 136838
- Franco, H. E. C., de Vega, D. S. U., & Vásquez, S. N. (2022). Escorias básicas de Siderúrgica: potencial de uso como material de encalado en agricultura (Vol. 178). Editorial de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia-UPTC
- Gómez Avellaneda, C. (2019). Estudio del comportamiento de mezclas asfálticas con escoria de horno de arco eléctrico (Doctoral dissertation, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia)
- Gorrín, K., María, M., Mujalli, G., López, J., & Rodríguez, A. (2016). Valorización de la escoria como co-producto siderúrgico para un modelo de producción y consumo ambientalmente sustentable. *Saberes en Ciencia, Tecnología e Innovación*, 3(2), 55
- Hainin, M. R., Aziz, M. M. A., Ali, Z., Jaya, R. P., El-Sergany, M. M., & Yaacob, H. (2015). Steel slag as a road construction material. *Jurnal Teknologi*, 73(4), 33-38
- Hernandez, N. M., Sánchez, J. A. V., Manzano, M. A. R., García, H. M. B., & Prado, D. (2020). USO DE LA ESCORIA DE HORNO DE ARCO ELÉCTRICO (EHAE) COMO AGREGADO FINO PARA LA PRODUCCIÓN DE MORTERO ESTRUCTURAL. Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería

- Kumar, P., & Shukla, S. (2023). Utilization of steel slag waste as construction material: A review. *Materials Today: Proceedings*, 78, 145-152
- Kumar, S., Dhara, S., Kumar, V., Gupta, A., Prasad, A., Keshari, K., & Mishra, B. (2019). Recent trends in slag management & utilization in the steel industry. *Miner. Met. Rev.*, 2019, 94-102
- Liu, G., Rong, H., & Wang, J. (2022). Valorization of converter steel slag in sustainable mortars by a combined alkali and carbonation activation. *Journal of Cleaner Production*, 370, 133519
- Madías, J. (2015). Reciclado de escorias de acería. *SUSTENTABILIDAD DE LA INDUSTRIA*.
- Maghool, F., Arulrajah, A., Du, Y. J., Horpibulsuk, S., & Chinkulkijniwat, A. (2017). Environmental impacts of utilizing waste steel slag aggregates as recycled road construction materials. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 19, 949-958
- Malagón, E., & Ramos, C. (2023). La escoria siderúrgica de alto horno como alternativa ecológica en la producción de materiales de construcción: revisión
- Motz, H., & Geiseler, J. (2001). Products of steel slags an opportunity to save natural resources. *Waste management*, 21(3), 285-293
- Ong, S. K., Mo, K. H., Alengaram, U. J., Jumaat, M. Z., & Ling, T. C. (2018). Valorization of wastes from power plant, steel-making and palm oil industries as partial sand substitute in concrete. *Waste and Biomass Valorization*, 9, 1645-1654
- Ordúz Pérez, P. J., & Ruiz García, D. D. (2021). Residuos minerales, industriales y de siderurgia, y su implementación en la elaboración de materiales de construcción en el departamento de Boyacá desde experiencias a nivel nacional e internacional (Doctoral dissertation).
- Orrego Santa, O. A. (2015). Desarrollo sostenible en la industria siderúrgica colombiana: visiones, principios y prácticas.

- Parra Araque, L. M., & Sánchez García, D. P. (2010). Análisis de la valorización de escorias negras como material agregado para concreto en el marco de la gestión ambiental de la siderúrgica Diaco. Municipio de Tuta Boyacá
- Pasetto, M., Baliello, A., Giacomello, G., & Pasquini, E. (2017). Sustainable solutions for road pavements: A multi-scale characterization of warm mix asphalts containing steel slags. *Journal of Cleaner Production*, 166, 835-843
- Paya Bernabeu, J. J. (2012). La "transmutación" sostenible de los residuos para nuevas materias primas en el ámbito del concreto. *Dyna*, 79(175), 38-47
- Pérez, A. M. S. (2012). Selección de tecnologías apropiadas para el aprovechamiento de la escoria en el sector siderúrgico (Doctoral dissertation, Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Ciencias Ambientales. Administración Ambiental)
- Pérez Fernández, Y. (2015). Estudio de durabilidad del hormigón con áridos siderúrgicos de horno de arco eléctrico (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya)
- Perez-Garcia, F., Parron-Rubio, M. E., Garcia-Manrique, J. M., & Rubio-Cintas, M. D. (2019). Study of the suitability of different types of slag and its influence on the quality of green grouts obtained by partial replacement of cement. *Materials*, 12(7), 1166
- Perez Garcia, F. (2019). Utilización de residuos siderúrgicos para diseño y dosificación de diferentes tipos de material cementante en estructuras sostenibles
- PILÓNETA, G. M. (2022). Influencia del proceso en la sostenibilidad de los residuos: el caso de la escoria de acería
- Pribulova, A., & Futas, P. (2017). METALLURGICAL SLAG IN CIVIL ENGINEERING. In 17TH INTERNATIONAL MULTIDISCIPLINARY SCIENTIFIC GEOCONFERENCE SGEM 2017 (pp. 137-144)
- Ramirez Sanchez, J. M. (2021). Modelos de valoración de residuos como aporte a la economía circular en Colombia

- Rojas, M. F., & De Rojas, M. S. (2004). Chemical assessment of the electric arc furnace slag as construction material: Expansive compounds. *Cement and Concrete research*, 34(10), 1881-1888.
- Rojas-Manzano, M. A., Otálvaro-Calle, I. F., Pérez-Caicedo, J. A., Benavides, H. M., & Ambriz-Fregoso, C. (2021). Uso de las escorias de horno de arco eléctrico (EHAE) en la construcción-estado del arte. *Revista UIS ingenierías*, 20(2), 53-63
- Rubio, M. E. P. (2018). *Industrialización de procesos y valoración de residuos siderúrgicos* (Doctoral dissertation, Universidad de Málaga)
- Salazar Barco, J. H. (2003). *Gestión ambiental en residuos de acerías: reutilización de escorias*.
- Sánchez, H. M. (2016). Estado del Arte sobre las Escorias Negras de Horno de Arco Eléctrico y su Aplicaciones en Pavimentos. *L'esprit Ingénieur*, 7(1)
- Santander, U. I., & Mineroenergética, U. U. D. (2018). Realizar un análisis del potencial de reutilización de minerales en Colombia y definir estrategias orientadas a fomentar su aprovechamiento por parte de la industria en el país bajo un enfoque de economía circular.
- Shang, W., Peng, Z., Huang, Y., Gu, F., Zhang, J., Tang, H., ... & Jiang, T. (2021). Production of glass-ceramics from metallurgical slags. *Journal of Cleaner Production*, 317, 128220
- Singh, R., Chaturvedi, V., Chaurasiya, A. K., & Patel, M. (2020, February). Utilization of Industrial Waste in Concrete Mixes—A Review. In *International Conference on Innovative Technologies for Clean and Sustainable Development*. Cham: Springer International Publishing.
- Universidad EAFIT. (2017). [Título del artículo, si está disponible]. Recuperado de <https://www.eafit.edu.co/investigacion/revistacientifica/edicion-165/Paginas/centro-argos-eafit-innovacion.aspx>
- Wu, S., Xue, Y., Ye, Q., & Chen, Y. (2007). Utilization of steel slag as aggregates for stone mastic asphalt (SMA) mixtures. *Building and environment*, 42(7), 2580-2585

Xu, D., & Li, H. (2009). Future resources for eco-building materials: I. Metallurgical slag. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 24(3), 451-456

Yépez, I. E. S. (2017). Incorporación de escorias siderúrgicas en hormigones autocompactantes de altas prestaciones (Doctoral dissertation, Universidad de Cantabria)

Yi, H., Xu, G., Cheng, H., Wang, J., Wan, Y., & Chen, H. (2012). An overview of utilization of steel slag. *Procedia Environmental Sciences*, 16, 791-801