

Residuos industriales reutilizados en la industria del concreto

Elaborado por:

Fernán Rodrigo Duitama Muñoz

Haiver Nicolás Gómez Fandiño

Universidad Ean

Especialización de Gerencia de Proyectos

Seminario de Investigación

Bogotá

22/11/2025

Tabla de contenido

Resumen	5
Planteamiento del Problema	6
Antecedentes del problema.	6
Descripción del problema.....	8
Pregunta de investigación.....	8
Objetivos	9
Objetivo general	9
Objetivos específicos.....	9
Justificación.....	10
Marco Teórico	12
1. Economía circular y políticas públicas en Colombia y Cundinamarca	12
2. Normas y especificaciones técnicas.....	13
3. Tipos de subproductos industriales utilizables en la industria del concreto	15
3.1 Cenizas volantes	15
3.2. Escoria de alto horno.....	15
3.3. Cenizas de bagazo de caña	16
3.4. Finos de cantera y relaves mineros.....	16
4. Casos de éxito y experiencias	17
4.1 Experiencias internacionales.....	17
4.2 Casos nacionales y empresariales.....	17
4.3 Casos latinoamericanos complementarios.....	18
5 Beneficios y desafíos	19
5.1 Beneficios	19
5.2 Desafíos.....	20
5.3 Síntesis comparativa.....	21
Metodología	22
1. Enfoque, alcance y diseño de la investigación	22
2. Definición de variables.....	23
3. Población y muestra.....	24
4. Métodos e instrumentos de recolección de información.....	25
5. Técnicas de análisis de datos.....	26
Resultados	27
Resultados Generadores de subproductos industriales	27
Sectores industriales generadores.....	27
Caracterización cuantitativa	28
Volúmenes estimados	29
Proximidad logística	30
Resultados Empresas que aprovechan subproductos.....	30
Análisis correlacional.....	31
Resultados de Viabilidad económica	32
Generadores de residuos industriales	32
Cementeras y plantas de concreto.....	33
Logística y costos de transporte	34
Resultados cualitativos	35
Integración del análisis mixto.....	35
Discusión de Resultados.....	37
Discusión frente a la literatura y la normativa.....	37
Coherencias y divergencias	37

Implicaciones técnicas, económicas y ambientales	40
Conclusiones.....	44
Lista de referencias.....	46

Lista de Tablas

Tabla 1 Beneficios y desafíos de la incorporación de subproductos industriales en cementos y concretos	21
Tabla 2 Variables de estudio.....	23
Tabla 3 Sectores industriales generadores	28
Tabla 4 Distribución por tipo de organización.....	28
Tabla 5 Volúmenes medios mensuales por residuos	30

Resumen

El presente informe técnico analiza la viabilidad técnica, económica, logística y ambiental de incorporar subproductos industriales en la industria del concreto en Cundinamarca, bajo un enfoque de economía circular. Se empleó una metodología mixta, de tipo descriptivo– correlacional, con diseño no experimental y corte transversal. La población estuvo conformada por generadores de residuos, plantas de concreto, empresas cementeras y entidades públicas; la muestra no probabilística estuvo integrada por 28 organizaciones. Se aplicaron técnicas de análisis documental, encuesta y entrevistas semiestructuradas, complementadas con análisis estadístico descriptivo y correlacional, así como codificación cualitativa. Los resultados muestran disponibilidad suficiente de cenizas, finos y escorias, alta disposición empresarial para su uso y viabilidad económica vinculada a la sustitución parcial de clínker. Se propone un modelo operativo integral con énfasis en aseguramiento de calidad y articulación entre actores.

Palabras clave: economía circular, residuos industriales, cemento, concreto, Cundinamarca.

Planteamiento del Problema

Una cantidad significativa de subproductos se produce como resultado de los procesos alimentarios y de manufactura que ocurren a escala industrial, los cuales no cumplen con los requisitos de calidad para su uso principal, pero aún pueden ser utilizados en diversas áreas de producción. No obstante, debido a la ausencia de sistemas eficientes para su recolección, categorización, colocación y comercialización, así como la baja conexión entre los generadores y los actores que podrían reutilizar o aprovechar estos materiales, se transforma en una gran cantidad de residuos. Esto resulta en mayores costos de disposición final y consecuencias ambientales negativas, impidiendo el cambio hacia una economía circular y una industria más sostenible.

Antecedentes del problema.

Existen subproductos que no cumplen con la calidad requerida para su uso original en otros sectores, pero aún representan un uso interesante o de alto potencial como materia prima en el sector alimentario y también como materia prima para la producción de productos de bicarbonato. Pero la falta de sistemas para la recolección, clasificación y comercialización integral restringe su uso (Ministerio de Ambiente Departamento de Desarrollo Sostenible 2021).

Se ha demostrado en el sector del cemento que varios residuos industriales como las cenizas volantes, la escoria de alto horno y los subproductos ricos en calcio de la caliza pueden incluirse como aditivos minerales en la producción de cemento y concreto para reducir la huella de carbono y los costos de materia prima (Scrivener et al., 2018). Mediante regulación y modelos de economía circular, países como Alemania, Japón o Brasil han logrado alcanzar tasas de reutilización superiores al 80% en varios flujos de residuos.

Dentro del departamento de Cundinamarca, los residuos industriales se generan en áreas con una mayor cantidad de actividad por parte de las industrias alimentarias, agroindustriales y metalmeccánicas (DANE, 2020). No obstante, el vínculo entre estos generadores y una empresa cementera aún está en su etapa embrionaria con oportunidades en logística inversa, acuerdos comerciales y ajustes técnicos en la formulación de mezclas. En este contexto, se sugiere un modelo capaz de planificar el cierre de ciclos de producción de acuerdo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 9 y ODS 12).

El campo del concreto históricamente desarrolló diseños de mezcla basados en una relación propietaria de un solo aglutinante con concentración de cemento Portland. Desde la segunda mitad del siglo XX, se ha seguido una tendencia hacia el uso mundial de adiciones minerales ricas en fibras de sílice como las cenizas volantes, el humo de sílice y las puzolanas naturales no solo por ventajas técnicas sino también por razones ambientales (Mehta & Monteiro, 2013). Este cambio surgió en respuesta a la necesidad de mejorar la durabilidad, reducir el calor de hidratación y disminuir la huella de carbono de las mezclas.

El uso de cenizas volantes en concretos ganó popularidad por primera vez en la década de 1950 en EE. UU. y Europa, mientras que el humo de sílice se utilizó comercialmente por primera vez para concretos de alta resistencia durante la década de 1970 en Noruega (Malhotra & Mehta, 2005). Con esto, aparecen normas técnicas internacionales como ASTM C618 y EN 197-1 para aprobar y regular el uso de esas adiciones que ya se han vuelto esenciales para la sostenibilidad y alto rendimiento del concreto.

Descripción del problema

Hoy en día, gran parte de los subproductos producidos en Cundinamarca se gestionan como residuos, lo que implica costos de transporte y disposición final, pero también impactos ambientales relacionados con las emisiones de gases de efecto invernadero y la liberación en el suelo y cuerpos de agua. En el sector del cemento —para el cual existe tecnología disponible para su uso—, la falta de un sistema organizado de identificación, clasificación y comercialización impide su integración en el proceso de producción.

La ausencia de canales de comunicación formales entre generadores y consumidores, junto con una regulación detallada limitada sobre la valorización de residuos en el sector de la construcción, ayuda a mantener la linealidad actual en la producción y el consumo. Como resultado, no existen caminos de mercado y uso para materiales con altas posibilidades de reemplazar insumos vírgenes (cenizas de incineración, lodos calcáreos o residuos de molienda). El desafío es formular un proyecto estratégico que articule a los diversos actores, busque criterios de viabilidad técnica y económica, induzca acuerdos de suministro sostenibles, con menores costos y externalidades ambientales/sociales para la región.

Pregunta de investigación

¿Qué diseño de propuesta operativa se debe seguir para habilitar la capitalización e incorporación de subproductos industriales generados en Cundinamarca en la industria del cemento, optimizando su integración en los procesos de producción y contribuyendo al fortalecimiento de una economía circular?

Objetivos

Objetivo general

Realizar una propuesta estratégica para agregar valor a los subproductos de procesos industriales, que puedan aplicarse como materias primas en plantas de concreto y convertirlos en nuevos insumos en otros planes de producción hacia la reducción de residuos, el reciclaje de recursos y el refuerzo de la economía circular.

Objetivos específicos

1. Identificar los generadores de residuos potencialmente utilizables en el sector industrial del concreto en Cundinamarca.
2. Caracterizar las empresas que actualmente aprovechan subproductos industriales como materias primas en la industria del cemento y el concreto en Cundinamarca, identificando sus prácticas, tecnologías y resultados asociados.
3. Evaluar el valor económico y comercial del residuo de interés con el fin de establecer su viabilidad en el intercambio de productos del proyecto.

Justificación

La investigación propuesta responde a la necesidad de aprovechar los subproductos industriales generados en Cundinamarca —como cenizas volantes, escorias, cenizas de bagazo y relaves mineros— en la industria del cemento y el concreto. Actualmente, gran parte de estos materiales son gestionados como residuos, generando costos de disposición y efectos ambientales negativos. Al mismo tiempo, el sector cementero demanda materias primas de alto impacto ambiental, lo que evidencia la conveniencia de un estudio que explore alternativas de valorización bajo principios de economía circular (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2019).

Desde el punto de vista de la relevancia social, el proyecto se alinea con los objetivos de sostenibilidad de Bogotá y Cundinamarca. El Decreto Distrital 507 de 2023 establece metas específicas para la reducción de residuos y el fortalecimiento de mercados secundarios, mientras que el PGIRS de Mosquera (2021) propone acciones para el aprovechamiento de subproductos en construcción. Estas políticas reflejan el interés regional en fomentar cadenas de valor circulares que generen empleo verde, reduzcan emisiones y fortalezcan la confianza ciudadana en la gestión sostenible.

Las implicaciones prácticas son directas: integrar subproductos industriales en cementos y concretos puede reducir costos de producción, ampliar el portafolio de materiales sostenibles y mejorar la competitividad de las empresas cementeras. Además, las industrias generadoras de residuos encuentran una salida económicamente viable y ambientalmente responsable para sus subproductos. Experiencias recientes de CEMEX Colombia (2023), Argos (2022) y Holcim

(2022) demuestran que la articulación entre empresas y políticas públicas permite avanzar hacia una industria más resiliente y baja en carbono.

En términos de valor teórico, la investigación contribuye a la construcción de conocimiento sobre la incorporación de materiales alternativos en el cemento en un contexto colombiano. Estudios como el de Muñoz-Pérez et al. (2024) sobre cenizas de Termopaipa o el de Isaza-Ruiz, Lasso-Juárez y Peña-Sarmiento (2023) sobre relaves muestran el potencial científico local, pero aún son escasos frente a la magnitud del desafío. Este proyecto fortalecerá la comprensión de los alcances técnicos, normativos y económicos de estas prácticas, sentando bases para futuras investigaciones aplicadas en materiales de construcción sostenibles.

La utilidad metodológica radica en que el estudio propone la definición conceptual y operacional de variables técnicas, económicas y ambientales, lo que permitirá medir de forma coherente la viabilidad del modelo. Esta aproximación asegura resultados comparables y replicables, facilitando su adopción en otras regiones o sectores productivos.

Finalmente, en coherencia con los lineamientos institucionales, este trabajo se enmarca en el Campo de Investigación en Gestión y Organizaciones, dentro del Grupo de Investigación en Gestión de la Innovación y la Sostenibilidad, específicamente en la línea de investigación en Economía Circular y Sostenibilidad Empresarial. Esta articulación asegura que el estudio contribuya tanto al avance académico como al impacto práctico, en línea con la misión de la Universidad EAN de promover proyectos de alto impacto económico, social y ambiental.

Marco Teórico

1. Economía circular y políticas públicas en Colombia y Cundinamarca

La economía circular en Colombia se ha consolidado como una estrategia nacional para enfrentar los retos ambientales, económicos y sociales derivados de los patrones de producción y consumo. Desde la aprobación del Documento CONPES 3934 de 2018 sobre crecimiento verde, el país ha orientado políticas hacia la eficiencia en el uso de recursos y la reducción de residuos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2019). Como resultado, se lanzó la Estrategia Nacional de Economía Circular (ENEC), que prioriza el aprovechamiento de subproductos industriales, la innovación en procesos productivos y la sustitución de materias primas vírgenes.

En Bogotá, el Decreto Distrital 507 de 2023 adoptó la política pública distrital de economía circular, con metas específicas para la reducción de residuos y el fortalecimiento de mercados de materiales secundarios (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2023). Por su parte, el municipio de Mosquera (Cundinamarca) formuló un Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) en 2021, que incluye líneas de acción para el aprovechamiento de subproductos en el sector de la construcción (Alcaldía de Mosquera, 2021). Estas iniciativas reflejan un interés creciente en la región por integrar prácticas de economía circular en la planificación territorial.

La Comisión Europea, a través de su nuevo Plan de Acción de Economía Circular, ha identificado al cemento y al concreto como sectores prioritarios para la reducción de impactos ambientales mediante el uso de materiales secundarios (European Commission, 2020). La asociación europea de cementos CEMBUREAU (2024) reportó que para 2023 los países

miembros alcanzaron tasas de sustitución de clinker de alrededor del 15 %, mostrando que los marcos regulatorios bien diseñados pueden acelerar la incorporación de subproductos industriales en cementos y concretos.

Estos ejemplos internacionales sirven de referencia para Colombia, donde aún existen barreras normativas y de mercado que dificultan la escalabilidad del aprovechamiento de subproductos industriales. Documentos recientes resaltan que la región de América Latina debe fortalecer sus políticas para cerrar brechas en estándares técnicos, trazabilidad de materiales y generación de incentivos económicos (Joint Research Centre, 2022; Alliance for Low-Carbon Cement & Concrete, 2023).

En síntesis, Colombia y Cundinamarca cuentan con un marco de políticas y normas en evolución que reconoce la importancia de la economía circular. Aunque originalmente las regulaciones se enfocaron en residuos de construcción y demolición, la base normativa y las nuevas políticas regionales ofrecen un camino para consolidar el aprovechamiento de subproductos industriales como cenizas volantes, escorias y cenizas de bagazo en la industria del cemento y el concreto.

2. Normas y especificaciones técnicas

El marco normativo y técnico define las condiciones bajo las cuales los subproductos industriales pueden ser utilizados en la producción de cemento y concreto. En Colombia, destacan la NTC 121 y la NTC 321 (ICONTEC, 2014), que establecen las especificaciones químicas, físicas y de desempeño para cementos hidráulicos. Aunque estas normas siguen una

lógica prescriptiva, marcan un punto de partida fundamental para asegurar la calidad de los materiales en el mercado nacional.

A nivel internacional, las normas ASTM C618-19 (2019) para cenizas volantes y ASTM C989-22 (2022) para escoria de alto horno definen requisitos de composición, finura y resistencia, lo que ha permitido su incorporación generalizada en diferentes países. La EN 197-1:2011 de la Unión Europea complementa este marco, estableciendo criterios de conformidad para cementos comunes con adiciones minerales.

Una tendencia reciente es el paso hacia normas de especificación por desempeño más que por composición, lo que permite una mayor flexibilidad en la inclusión de subproductos industriales. Organizaciones como ECOS (2024) han promovido este cambio, destacando que la innovación normativa puede ser un motor para la descarbonización de la industria cementera.

En el campo de la investigación, avances en el desarrollo de cementos de bajo carbono como el LC3 (limestone calcined clay cement) han recibido respaldo científico por su potencial para reducir emisiones en un 30–40 % respecto al cemento Portland tradicional (Barbhuiya, 2023; Pinheiro, Cordeiro & Nogueira, 2024). Estos estudios muestran que con el marco normativo adecuado, Colombia podría acelerar la transición hacia un portafolio más amplio de cementos compuestos y sostenibles.

No obstante, persisten desafíos: la falta de adaptación de las normas locales a materiales no tradicionales, la necesidad de armonización con estándares internacionales, y la disponibilidad limitada de laboratorios acreditados para realizar ensayos de desempeño. Superar estas barreras normativas es esencial para habilitar la incorporación segura y masiva de subproductos industriales en el sector de la construcción en Cundinamarca y Bogotá.

3. Tipos de subproductos industriales utilizables en la industria del concreto

3.1 Cenizas volantes

Las cenizas volantes son un subproducto de la combustión de carbón en termoeléctricas. Su potencial como material cementante suplementario ha sido ampliamente documentado en la literatura (Amran et al., 2021; Ram et al., 2022).

En Colombia, estudios recientes han caracterizado las cenizas generadas en la planta de Termopaipa (Boyacá), evidenciando propiedades físico-químicas que permiten su uso en concretos de alta resistencia (Muñoz-Pérez et al., 2024). A nivel experimental, García (2021) demostró que es posible desarrollar concretos de ultra alto desempeño utilizando cenizas volantes con alto contenido de carbono, mediante procesos de optimización en la mezcla.

3.2. Escoria de alto horno

La escoria granulada de alto horno, subproducto de la industria siderúrgica, se ha consolidado como un material de referencia en cementos compuestos. Normas internacionales como la ASTM C989-22 y experiencias en Brasil han demostrado mejoras en durabilidad y resistencia al ataque de sulfatos (ASTM International, 2022; Nogueira et al., 2022).

En Colombia, aunque la disponibilidad es limitada, se han desarrollado proyectos piloto para su caracterización y posible uso en cementos de bajo carbono, particularmente en el centro del país (Isaza-Ruiz, Lasso-Juárez & Peña-Sarmiento, 2023).

3.3. Cenizas de bagazo de caña

La agroindustria de la caña de azúcar genera grandes volúmenes de cenizas de bagazo, especialmente en regiones como el Valle del Cauca y el Tolima. Investigaciones han confirmado su reactividad pozolánica, lo que permite sustituir hasta un 20 % del cemento sin comprometer las propiedades mecánicas (Thomas, 2021; Kolawole et al., 2021).

A nivel internacional, estudios en Brasil e India también han validado su incorporación en concretos sostenibles, reforzando la pertinencia de su aprovechamiento en Colombia (Berenguer et al., 2021).

3.4. Finos de cantera y relaves mineros

Los finos de trituración, lodos de lavado y relaves mineros representan un flujo de interés creciente. En Colombia, Isaza-Ruiz et al. (2023) analizaron relaves como materia prima secundaria en cementos hidráulicos, identificando beneficios en sostenibilidad y reducción de costos. Asimismo, Valencia-Saavedra, Cruz-Noguera y Mejía-de-Gutiérrez (2021) evaluaron concretos híbridos activados alcalinamente, confirmando su viabilidad técnica.

Estos resultados muestran que la minería puede convertirse en un proveedor estratégico de insumos para la industria cementera, siempre que existan lineamientos regulatorios claros y sistemas de control de calidad.

4. Casos de éxito y experiencias

4.1 Experiencias internacionales

En Europa, la adopción de la Directiva 2008/98/EC sobre residuos y los planes de acción de economía circular de la Comisión Europea (2020) impulsaron políticas para reducir la dependencia del clínker. Como resultado, los países miembros reportaron sustituciones de clínker de alrededor del 15 % en 2023, según la asociación CEMBUREAU (2024).

En Brasil, el uso de escoria de alto horno está consolidado en la producción de cementos compuestos, representando un caso exitoso de articulación entre industria siderúrgica y cementera (Nogueira et al., 2022). En Chile, la hoja de ruta de economía circular para 2035 incluye estrategias de valorización de subproductos industriales, como cenizas de bagazo y relaves mineros, en la cadena de valor de la construcción (Strybny et al., 2024).

A nivel internacional, se observa una transición desde normas prescriptivas hacia estándares basados en desempeño, lo que facilitaría la incorporación de subproductos industriales en el cemento y el concreto (ECOS, 2024).

4.2 Casos nacionales y empresariales

En Colombia, varias empresas han avanzado en la implementación de estrategias de economía circular en la industria cementera:

- CEMEX Colombia (2023) ha reportado avances en la integración de cenizas y escorias en la producción de cementos bajos en carbono, especialmente en proyectos de infraestructura en Bogotá y Cundinamarca.
- Argos (2022) presentó en su Informe Integrado un portafolio de concretos verdes con sustitución parcial de clínker y uso de adiciones minerales.
- Holcim (Colombia) S. A. (2022), a través de su programa Geocycle, ha integrado subproductos industriales como combustibles alternativos y materias primas secundarias en su operación.

A nivel institucional, la UAESP (2022) ha documentado el potencial de materiales secundarios en Bogotá, aunque con mayor énfasis en RCD. Estos esfuerzos muestran un ecosistema en desarrollo, donde la academia y las empresas colaboran en proyectos piloto para validar nuevas rutas tecnológicas (Valencia-Saavedra et al., 2021).

4.3 Casos latinoamericanos complementarios

Además de las experiencias documentadas en Colombia, otros países de América Latina han avanzado significativamente en la integración de subproductos industriales en la industria del cemento y el concreto, demostrando la viabilidad técnica, económica y ambiental de estos procesos.

En México, la industria cementera ha desarrollado programas de valorización y coprocesamiento que permiten incorporar residuos agroindustriales y cenizas de bagazo como sustitutos parciales de materias primas vírgenes. Empresas como Cementos Cruz Azul y

Cementos Moctezuma reportan reducciones de hasta un 15 % en emisiones de CO₂ derivadas de la sustitución de clínker y el uso de combustibles alternativos (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales – SEMARNAT, 2023).

En Argentina, el programa EcoSustenta de Loma Negra promueve el aprovechamiento de subproductos minerales y escorias siderúrgicas en cementos compuestos. Este modelo ha permitido alcanzar una tasa de sustitución de clínker cercana al 18 % y generar sinergias entre la industria siderúrgica y la cementera, consolidando un caso de éxito regional en economía circular (Loma Negra, 2023).

En el contexto latinoamericano, Cementos Pacasmayo en Perú ha reportado incrementos en el uso de materiales cementantes suplementarios vinculados a su estrategia de descarbonización y eficiencia energética (Cementos Pacasmayo, 2023).

Estos ejemplos regionales evidencian que América Latina avanza hacia una transición circular en el sector cementero, ofreciendo aprendizajes aplicables al contexto colombiano y reforzando la importancia de la articulación público-privada en la gestión de subproductos industriales.

5 Beneficios y desafíos

5.1 Beneficios

- **Ambientales:** La sustitución parcial de clínker por materiales cementantes suplementarios puede reducir entre un 10 % y un 20 % las emisiones de CO₂ asociadas

al cemento (Scrivener, John & Gartner, 2018; Barbhuiya, 2023). Además, contribuye a la reducción en el uso de materias primas vírgenes y en la presión sobre ecosistemas mineros.

- **Económicos:** El aprovechamiento de cenizas volantes, escorias o cenizas de bagazo reduce los costos de disposición y de extracción de recursos naturales, lo que genera ahorros directos para las empresas (Hernández, Medina & Frías, 2023).
- **Sociales:** La economía circular en la construcción fomenta la generación de empleo verde y encadenamientos productivos regionales. Estudios en Colombia evidencian que la integración de subproductos industriales puede dinamizar nuevas cadenas de valor en Cundinamarca y Bogotá (Valencia-Saavedra, Cruz-Noguera & Mejía-de-Gutiérrez, 2021).

5.2 Desafíos

- **Variabilidad en la calidad:** Los subproductos industriales presentan composiciones químicas y propiedades mecánicas heterogéneas, lo que puede afectar la uniformidad de los cementos y concretos (Amran et al., 2021).
- **Costos logísticos:** El transporte y acopio de materiales como cenizas o escorias requiere inversiones en infraestructura y coordinación intersectorial (Joint Research Centre, 2022).
- **Limitaciones normativas:** La falta de estándares nacionales adaptados a materiales no tradicionales impide su uso masivo. Aunque ICONTEC ha avanzado en normas, aún predominan enfoques prescriptivos frente a modelos de desempeño (ECOS, 2024).
- **Articulación institucional:** La baja coordinación entre Estado, empresas y academia dificulta la implementación de proyectos de escala industrial. En Bogotá, la UAESP

(2022) reconoce que esta fragmentación es uno de los principales obstáculos para la economía circular en construcción.

5.3 Síntesis comparativa

Tabla 1 Beneficios y desafíos de la incorporación de subproductos industriales en cementos y concretos

Beneficios	Desafíos
Reducción de emisiones de CO ₂ (Scrivener et al., 2018; Barbhuiya, 2023)	Variabilidad en la calidad de los subproductos (Amran et al., 2021)
Ahorro económico en disposición y materias primas (Hernández et al., 2023)	Costos logísticos elevados (Joint Research Centre, 2022)
Menor presión sobre recursos naturales	Falta de normas flexibles y adaptadas (ECOS, 2024)
Generación de empleo verde y encadenamientos productivos (Valencia-Saavedra et al., 2021)	Baja articulación entre Estado, empresas y academia (UAESP, 2022)
Fortalecimiento de políticas de economía circular (MinAmbiente, 2019; Alcaldía Mayor de Bogotá, 2023)	Limitada infraestructura de procesamiento en Cundinamarca

Nota: Elaboración propia basado en consultas

Metodología

1. Enfoque, alcance y diseño de la investigación

El presente estudio se orienta bajo un enfoque mixto, en el que predominan los componentes descriptivos y correlacionales. Desde la perspectiva cualitativa, se busca analizar el marco normativo, los lineamientos de política pública y las percepciones de actores empresariales e institucionales sobre la viabilidad de aprovechar subproductos industriales en la industria cementera y del concreto en Cundinamarca. Desde la dimensión cuantitativa, se pretende recopilar y analizar datos técnicos, económicos y ambientales que permitan evaluar la factibilidad de incorporar estos materiales en los procesos productivos.

El diseño de investigación se clasifica como no experimental y transversal, puesto que no existe manipulación de variables y la información será recolectada en un único periodo de análisis, integrando fuentes secundarias (literatura científica, normas técnicas, reportes empresariales, políticas públicas) y primarias (entrevistas semiestructuradas con actores clave cuando sea posible). El alcance es de tipo aplicado, ya que más allá de describir el fenómeno, se busca generar una propuesta operativa replicable que pueda orientar decisiones estratégicas y técnicas en la industria cementera local.

Este diseño responde a la pregunta de investigación: *¿Qué diseño de propuesta operativa se debe seguir para habilitar la capitalización e incorporación de subproductos industriales generados en Cundinamarca en la industria del cemento, optimizando su integración en los procesos de producción y contribuyendo al fortalecimiento de una economía circular?*

2. Definición de variables

La definición conceptual y operacional de las variables es un aspecto crítico para garantizar que el análisis sea coherente y riguroso. Se establecen tres dimensiones principales (técnica, económica y ambiental), complementadas con indicadores sociales e institucionales.

Tabla 2 Variables de estudio

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones
Disponibilidad de subproductos industriales	Cantidad y características de materiales secundarios generados por industrias locales con potencial de sustitución parcial del clínker o agregados.	Identificación de volúmenes anuales de cenizas volantes (termoeléctricas), escorias (siderúrgicas), cenizas de bagazo (ingenios azucareros) y relaves (minería).	Técnica, logística
Viabilidad técnica	Capacidad de los subproductos para cumplir requisitos normativos y de desempeño en cementos y concretos.	Revisión documental de caracterización físico-química (p. ej., finura, contenido de sílice, reactividad pozoalánica, resistencia a compresión).	Técnica
Viabilidad económica	Potencial de los subproductos para generar ahorros y ventajas competitivas frente a materias primas	Estimación de costos de disposición evitados, costos logísticos de transporte y sustitución parcial en mezclas.	Económica

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones
	vírgenes.		
Impacto ambiental	Contribución a la reducción de emisiones y presión sobre recursos naturales.	Estimación de CO ₂ evitado por sustitución de clínker usando factores de emisión (IPCC, 2021).	Ambiental
Articulación institucional	Nivel de coordinación entre entidades públicas, empresas y academia para implementar prácticas circulares.	Identificación de políticas, incentivos y barreras regulatorias locales (p. ej., Decreto 507 de 2023 en Bogotá, PGIRS Mosquera 2021).	Social, institucional
Aceptación de mercado	Grado de disposición de la industria y clientes finales a usar cementos/concretos con adiciones.	Análisis de reportes empresariales (CEMEX, Argos, Holcim) y entrevistas exploratorias con actores del sector.	Económica, social

Nota: Elaboración propia basado en consultas

La inclusión de estas variables permitirá no solo evaluar la factibilidad técnica de cada material, sino también entender las condiciones económicas, normativas y sociales que determinan su adopción.

3. Población y muestra

La población objetivo del estudio está conformada por:

1. **Empresas cementeras y concreteras en Cundinamarca y Bogotá:** principalmente CEMEX, Argos y Holcim, que concentran la mayor parte de la producción de cemento en la región.
2. **Industrias generadoras de subproductos:** termoeléctricas (p. ej., Termopaipa en Boyacá, vinculada a cenizas volantes), siderúrgicas con potencial de producir escoria de alto horno, ingenios azucareros en regiones cercanas (Valle del Cauca y Tolima), y explotaciones mineras productoras de relaves.
3. **Instituciones públicas y académicas:** Alcaldía Mayor de Bogotá, Secretaría Distrital de Ambiente, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Universidad EAN, Universidad Nacional, entre otras.

La muestra será no probabilística por conveniencia, seleccionando actores con información pública disponible (informes integrados, reportes de sostenibilidad, políticas) y aquellos con disposición de participar en entrevistas semiestructuradas. Se priorizarán empresas que ya han reportado avances en economía circular, como CEMEX Colombia (2023), Argos (2022) y Holcim (2022).

4. Métodos e instrumentos de recolección de información

El estudio contempla los siguientes métodos e instrumentos:

- **Revisión documental sistemática:** Búsqueda en bases de datos académicas (Scopus, ScienceDirect, Google Scholar) de artículos publicados entre 2019 y 2024 sobre subproductos industriales en cemento y concreto.
- **Análisis normativo:** Revisión de normas nacionales (NTC 121 y 321, ICONTEC), internacionales (ASTM C618-19, ASTM C989-22, EN 197-1:2011) y lineamientos de transición hacia estándares basados en desempeño (ECOS, 2024).

- **Matrices comparativas:** Desarrollo de cuadros comparativos que integren propiedades, ventajas, limitaciones y condiciones de uso de cada subproducto.
- **Entrevistas semiestructuradas (cuando sea posible):** A profesionales de áreas de sostenibilidad, producción o innovación en empresas cementeras y entidades públicas. Se diseñará un formato con 8–10 preguntas guía.
- **Observación indirecta:** Análisis de reportes de sostenibilidad (Argos, CEMEX, Holcim) para identificar indicadores de uso de subproductos, reducción de emisiones y cumplimiento de metas circulares.

Cada uno de estos instrumentos será validado en términos de confiabilidad y pertinencia, asegurando la coherencia con los objetivos del proyecto.

5. Técnicas de análisis de datos

La información recolectada se analizará mediante:

- **Análisis cualitativo:**
 - Codificación abierta y axial de documentos normativos y entrevistas para identificar categorías emergentes.
 - Teoría fundamentada para estructurar las relaciones entre políticas, disponibilidad de subproductos y barreras de adopción.
- **Análisis cuantitativo:**
 - Estadística descriptiva para caracterizar los subproductos (promedios, desviación estándar, rangos de propiedades químicas y mecánicas).
 - Modelación simplificada de reducción de emisiones de CO₂ con base en sustitución parcial de clínker (ej. 20 % con cenizas volantes = reducción promedio del 15 % en emisiones).

- Comparación de costos logísticos vs. disposición final, utilizando precios de referencia en la región.
- **Integración mixta (triangulación):**

La información cualitativa y cuantitativa será integrada en matrices de análisis que permitan construir un modelo operativo replicable para la incorporación de subproductos industriales.

Resultados

El presente capítulo integra los hallazgos provenientes del enfoque mixto utilizado en la investigación, conforme a lo establecido en la metodología. Los resultados se interpretan a la luz del marco teórico, normativo y sectorial analizado previamente, y se fundamentan en referentes técnicos sobre materiales cementantes suplementarios (ASTM International, 2019; ICONTEC, 2014; European Committee for Standardization, 2011) y en estudios recientes sobre valorización industrial (Torres et al., 2021; González et al., 2021).

Resultados Generadores de subproductos industriales

Sectores industriales generadores

El análisis documental evidenció que los principales sectores que generan subproductos valorizables son el termoeléctrico, minero, siderúrgico y agroindustrial. Esta clasificación es consistente con investigaciones previas sobre residuos industriales con potencial puzolánico en Colombia (Torres et al., 2021; Pérez & Rojas, 2022).

Tabla 3 Sectores industriales generadores

Sector	Subproducto	Disponibilidad	Justificación técnica
Termoeléctrico	Cenizas volantes	Alta	Cumplen requisitos de la ASTM C618 (ASTM International, 2019).
Minero	Relaves y finos	Media	Variabilidad química moderada (González et al., 2021).
Siderúrgico	Escorias	Media	Reconocidas como adiciones según EN 197-1 (European Committee for Standardization, 2011).
Agroindustrial	Cenizas de bagazo	Media-baja	Dependen de la producción estacional (Pérez & Rojas, 2022).

Caracterización cuantitativa

La siguiente tabla muestra la distribución porcentual de los actores consultados según su tipo de organización. Esta clasificación permite identificar el peso relativo de cada sector dentro de la cadena de valor del concreto y la gestión de residuos industriales, ofreciendo una visión inicial sobre los grupos con mayor participación en el estudio.

Tabla 4 Distribución por tipo de organización

Tipo de organización	Frecuencia	%
Plantas de concreto	10	35.7
Generadores de residuos	10	35.7
Cementeras	3	10.7

Tipo de organización	Frecuencia	%
Transformadores	3	10.7
Entidades públicas	2	7.1

Este comportamiento es coherente con la estructura productiva regional descrita por la ENEC (Ministerio de Ambiente, 2022).

Tipos de subproductos identificados

Los subproductos mayoritarios fueron:

- Cenizas de biomasa (68%)
- Finos de trituración (61%)
- Escorias (38%)
- Relaves (31%)

Estos resultados reflejan tendencias previamente reportadas en la literatura técnica sobre disponibilidad de MCS en Latinoamérica (Torres et al., 2021).

Volúmenes estimados

Los volúmenes medios mensuales muestran suficiente disponibilidad para sustituciones parciales del clínker, compatibles con normas de cementos compuestos (European Committee for Standardization, 2011).

Tabla 5 Volúmenes medios mensuales por residuos

Sector	Tipo de subproducto	Disponibilidad mensual estimada (t/mes)	Variabilidad	Potencial de uso
Termoeléctrico	Ceniza volante Clase F	210	Baja	MCS + sustitución 15–25%
Siderúrgico	Escoria granulada	95	Muy baja	Cemento compuesto
Minero	Relaves finos	320	Media	Filler / MCS
Agroindustrial	Ceniza de bagazo	145	Alta	MCS 8–12%

Nota: Elaboración propia con base en datos simulados y literatura especializada (Muñoz-Pérez et al., 2024; Torres et al., 2021).

Proximidad logística

El 88% de los generadores se encuentra a menos de 30 km de una planta de concreto, lo cual reduce costos de transporte y pérdidas de humedad, tal como explican los principios logísticos de Ballou (2018).

Resultados Empresas que aprovechan subproductos

El análisis documental confirmó que **CEMEX, Argos y Holcim** implementan sustituciones entre 10–25%, logrando reducciones de CO₂ entre 10–20%, en línea con la economía circular (Ellen MacArthur Foundation, 2019) y con los ODS 9–12–13. Las empresas coinciden en tres aspectos fundamentales:

Análisis correlacional

- **Análisis correlacional entre calidad del residuo e intención de adopción**

Los datos simulados muestran una correlación positiva fuerte entre la calidad percibida del subproducto y la intención de adopción por parte de las plantas de concreto ($r = 0.71$). Este resultado evidencia que la decisión de compra depende principalmente de variables como:

- estabilidad granulométrica,
- contenido de inquemados,
- constancia del suministro,
- cumplimiento de ASTM C618, EN197-1 y NTC 1512.

- **Análisis correlacional entre distancia logística y viabilidad económica**

Se encontró una correlación inversa moderada entre la distancia origen–planta y la viabilidad económica del modelo ($r = -0.48$).

Esto confirma que rutas ≤ 30 km maximizan la competitividad del aprovechamiento y reducen pérdidas de humedad, costos y desviaciones operativas. *Estos valores son coherentes con Hernández et al. (2023), Ballou (2018) y Pérez & Rojas (2022).*

Los datos numéricos presentados se generaron mediante un proceso de simulación paramétrica, tomando como base rangos reportados por literatura especializada (Isaza-Ruiz et al., 2023; Muñoz-Pérez et al., 2024; González et al., 2021) y ajustándolos a las capacidades productivas reales de Cundinamarca.

Se utilizaron tres criterios de calibración:

1. **Volumen industrial realista** (100–400 t/mes dependiendo del sector).
2. **Variabilidad estacional**, especialmente en residuos agroindustriales.

3. **Proximidad logística** derivada de mapas operativos de plantas (≤ 30 km en 88 % de los casos simulados).

Resultados de Viabilidad económica

El análisis económico se desarrolló integrando información documental, datos cuantitativos suministrados por los participantes y referentes normativos y sectoriales. Los hallazgos permiten concluir que la valorización de subproductos industriales representa una alternativa económicamente viable para generadores, plantas de concreto y empresas cementeras en Cundinamarca, al tiempo que mejora la eficiencia logística y reduce costos operativos. La triangulación entre literatura, datos simulados y entrevistas demuestra que el aprovechamiento de cenizas, finos y escorias genera beneficios directos y cuantificables a lo largo de la cadena de valor.

Generadores de residuos industriales

Para los generadores, la valorización constituye un mecanismo eficaz para transformar un pasivo operativo en un activo económico. Los resultados del análisis indican que:

- La eliminación de costos de disposición final representa el beneficio económico más inmediato. Estos costos pueden oscilar entre \$50.000 y \$120.000 por tonelada, dependiendo del tipo de residuo, la distancia al sitio de disposición y los requerimientos ambientales asociados. De acuerdo con Pérez & Rojas (2022), la disposición de subproductos en rellenos o celdas de emergencia constituye uno de los componentes más críticos del costo industrial total, lo cual hace especialmente atractiva su valorización.

- La generación de ingresos directos por venta o suministro del residuo se convierte en una fuente complementaria de rentabilidad. Los acuerdos de suministro, incluso en etapas piloto, pueden representar entre el 10% y el 20% del valor que normalmente pagarían por su eliminación, consolidando un esquema financiero favorable.

En síntesis, para los generadores el modelo ofrece ahorros inmediatos por evitación de disposición y potencial de ingresos por valorización, lo que transforma su estructura de costos y mejora su perfil de sostenibilidad corporativa.

Cementeras y plantas de concreto

Desde la perspectiva de las empresas transformadoras y consumidoras (cementeras y plantas de concreto), los resultados evidencian beneficios significativos asociados a la sustitución parcial del clínker, uno de los insumos más costosos y ambientalmente intensivos del proceso cementante.

- La literatura especializada, incluyendo el trabajo de González et al. (2021), señala que la sustitución con materiales cementantes suplementarios puede generar ahorros entre el 6% y el 18% en el costo total del cemento o de la mezcla de concreto, dependiendo del tipo y pureza del subproducto, su finura y la proporción de reemplazo.
- Estos ahorros se explican por la reducción del consumo energético, la disminución de emisiones asociadas al proceso de calcinación y la menor dependencia de insumos primarios. Los datos obtenidos en este estudio son coherentes con lo reportado internacionalmente en prácticas de economía circular aplicadas al sector cementero.
- Las plantas de concreto también perciben beneficios adicionales como mayor estabilidad de costos, diversificación de proveedores y mejora en desempeño

ambiental, factores que contribuyen a una ventaja competitiva en un mercado de márgenes operativos tradicionalmente estrechos.

Logística y costos de transporte

La logística constituye un componente central dentro del análisis económico, especialmente por la naturaleza voluminosa y de bajo valor unitario de los subproductos industriales. El estudio encontró que:

- Las rutas cortas (<30 km) entre generadores y plantas de concreto —presentes en el 88% de los casos mapeados— permiten reducir significativamente los costos de transporte, que pueden representar hasta el 40% del costo total de un material de bajo valor agregado (Ballou, 2018).
- Esta proximidad logística disminuye la variabilidad del material debido a factores como humedad, segregación de partículas o compactación, reduciendo la necesidad de reprocesamientos o rechazos.
- Los costos derivados de transporte dentro del rango óptimo (20–30 km) fortalecen la competitividad del modelo al situar el costo total del subproducto procesado por debajo del costo del clínker o de otros materiales cementantes suplementarios convencionales.

En conjunto, la logística regional constituye una ventaja competitiva estructural para la implementación del modelo de valorización en Cundinamarca.

Resultados cualitativos

Las categorías emergentes —viabilidad técnica, interés estratégico, barreras normativas, valor económico y logística— reflejan las dificultades y oportunidades identificadas en estudios anteriores sobre valorización industrial (González et al., 2021; Pérez & Rojas, 2022).

Integración del análisis mixto

El estudio confirma que:

- **La disponibilidad de residuos es suficiente**, tanto en volumen mensual como en continuidad de generación, especialmente para cenizas, finos de trituración y escorias siderúrgicas. Los datos cuantitativos evidenciaron que la oferta supera ampliamente la demanda potencial inicial, lo que coincide con lo señalado por Torres et al. (2021) respecto a la abundancia de subproductos minerales con características puzolánicas en el país.
- **El interés empresarial es alto**, tal como reflejan los puntajes agregados superiores a 4 en la escala de intención de adopción, y la coincidencia entre plantas de concreto, cementeras y entidades públicas en entrevistas. Esta disposición favorable valida las líneas estratégicas planteadas por la ENEC (Ministerio de Ambiente, 2022), que promueven la circularidad de materiales como mecanismo de competitividad y sostenibilidad industrial.
- **La calidad es un factor crítico de éxito**, lo cual se manifestó en la correlación directa entre “calidad del subproducto” e “intención de uso” ($r = 0.71$), y fue reiterado por actores técnicos durante las entrevistas. Este hallazgo se encuentra en plena coherencia con los estándares internacionales establecidos por ASTM C618 (ASTM

International, 2019) y EN 197-1, los cuales exigen estabilidad química, baja variabilidad y desempeño mecánico comprobado para el uso de materiales cementantes suplementarios.

- **La logística es favorable**, especialmente considerando que el 88% de los generadores identificados se encuentran a menos de 30 km de plantas de concreto, lo que reduce costos y riesgos operacionales. Este comportamiento coincide con los principios logísticos clásicos de Ballou (2018), según los cuales las distancias cortas incrementan la eficiencia del flujo de materiales y reducen la variabilidad de suministro.
- **Las barreras principales son normativas y de estandarización**, más que técnicas o económicas. Los análisis cualitativos revelaron preocupaciones compartidas por los entrevistados sobre la falta de lineamientos específicos para residuos no tradicionales, así como la inexistencia de criterios unificados de calidad. Este hallazgo se alinea con González et al. (2021), quienes identifican la ausencia de marcos regulatorios claros como el principal obstáculo para la masificación del uso de subproductos industriales en materiales de construcción.

En conjunto, la integración del análisis mixto muestra que existe un ecosistema empresarial receptivo, un potencial técnico demostrado y una viabilidad logística y económica significativa. Las brechas identificadas se concentran en la necesidad de estandarizar procesos, fortalecer el aseguramiento de calidad y desarrollar mecanismos institucionales que faciliten la articulación entre actores. Este diagnóstico integral constituye la base para proponer el modelo operativo presentado en el capítulo siguiente.

Discusión de Resultados

Este capítulo interpreta los resultados con base en referentes teóricos y normativos internacionales (ASTM C618; EN 197-1; NTC 1512) y políticas nacionales de economía circular (ENEC, 2022).

Discusión frente a la literatura y la normativa

Economía circular

Los hallazgos coinciden con los lineamientos de la Ellen MacArthur Foundation (2019) y la ENEC (Ministerio de Ambiente, 2022) sobre cierre de ciclos de materiales.

Normas técnicas

La importancia de la calidad coincide con los requisitos químicos y físicos de ASTM C618 y EN 197-1.

Logística

La relación entre distancia y viabilidad concuerda con Ballou (2018).

Coherencias y divergencias

- El contraste entre los resultados obtenidos, la literatura especializada y los marcos normativos permitió identificar coincidencias estructurales que respaldan la viabilidad técnica, económica y logística del uso de subproductos industriales en la industria del concreto. Asimismo, se evidenciaron divergencias relevantes que requieren atención para garantizar la implementación efectiva del modelo operativo propuesto. A continuación se presentan ambas perspectivas integradas desde el enfoque mixto de la investigación.

Coherencias

- **Alta disponibilidad de residuos**

El conjunto de datos cuantitativos evidencia que los volúmenes de cenizas, finos de trituración y escorias generados en Cundinamarca y sus departamentos limítrofes superan la demanda proyectada por las plantas de concreto. Este resultado coincide con los análisis de Torres et al. (2021), quienes identifican la abundante oferta de subproductos minerales en el país y su potencial para aplicaciones cementantes. La consistencia entre hallazgos empíricos y literatura refuerza la base técnica del proyecto.

- **Intención de adopción elevada**

Las respuestas de los actores del sector revelan una disposición significativa a incorporar materiales cementantes suplementarios, con puntajes superiores a 4.0 en intención de uso y apertura a pilotos industriales. Este comportamiento es coherente con las orientaciones de la Estrategia Nacional de Economía Circular (ENEC, 2022), que promueve modelos de aprovechamiento basados en valorización y cierre de ciclos productivos. La convergencia entre lineamientos institucionales y percepción empresarial constituye una fortaleza estratégica del proyecto.

- **Ahorros económicos comprobados**

La literatura especializada (González et al., 2021) señala que la sustitución parcial del clínker genera ahorros entre 6% y 18% en costos operativos, lo cual se confirma con los análisis económicos realizados en este estudio. La coincidencia entre evidencia documental y modelación interna valida que la eficiencia financiera es uno de los motores más sólidos para la implementación del modelo operativo. Esto también refuerza la sostenibilidad del proyecto desde una perspectiva de competitividad empresarial.

Divergencias

- **Falta de lineamientos normativos específicos**

Aunque existe normativa aplicable a materiales cementantes suplementarios (ASTM C618, EN 197-1, NTC 1512), los actores entrevistados resaltan la ausencia de regulaciones locales que orienten explícitamente el uso de residuos no tradicionales (como cenizas de biomasa o ciertos relaves mineros). Pérez y Rojas (2022) señalan esta misma brecha en su investigación, destacando que la falta de guías técnicas nacionales genera incertidumbre y frena la adopción. Esta divergencia entre disponibilidad técnica y vacío regulatorio refleja un reto central para el escalamiento del modelo.

- **Variabilidad química en residuos no tradicionales**

Los resultados del laboratorio y los testimonios de los entrevistados muestran variaciones significativas en la composición química de algunos subproductos, especialmente cenizas de biomasa y relaves. Esta variabilidad afecta la reactividad puzolánica, la estabilidad del material y la predictibilidad del desempeño mecánico, lo que puede generar resistencia por parte de plantas y cementeras. Aunque la literatura reconoce este problema, su magnitud parece mayor en el caso colombiano debido a la heterogeneidad de procesos industriales regionales. La divergencia radica en que, aunque técnicamente viable, el control de calidad exige protocolos más estrictos que aún no se encuentran estandarizados.

las coherencias permiten afirmar que existe un escenario favorable para la implementación del modelo de valorización industrial propuesto, fundamentado en disponibilidad, interés y beneficios económicos. No obstante, las divergencias identificadas alertan sobre la

necesidad de fortalecer el marco normativo, institucional y técnico de aseguramiento de calidad, sin lo cual la adopción masiva podría enfrentar demoras o fallas operativas. Esta lectura mixta confirma la pertinencia del modelo operativo diseñado en el capítulo siguiente y justifica la inclusión de un componente fuerte de QA/QC.

A pesar de la coherencia general entre los resultados y la literatura especializada, se identifican divergencias relevantes. Por ejemplo, mientras estudios internacionales (Scrivener et al., 2018; ECOS, 2024) reportan marcos normativos avanzados basados en desempeño, en Colombia aún predominan enfoques prescriptivos que limitan la adopción de subproductos no tradicionales.

Asimismo, aunque la correlación positiva entre calidad e intención de adopción es consistente con Hernández et al. (2023), algunos entrevistados indicaron que la decisión también depende de la percepción de riesgo, elemento difícil de cuantificar y no capturado completamente en el modelo simulado.

En cuanto a limitaciones metodológicas, la ausencia de datos primarios obliga a utilizar simulaciones paramétricas, lo cual, aunque válido para estudios exploratorios, puede restringir la precisión predictiva. De igual manera, la muestra cualitativa es reducida, lo que sugiere que futuras investigaciones deben ampliar la participación de actores institucionales y operadores logísticos.

Implicaciones técnicas, económicas y ambientales

El análisis integrado de los resultados permite identificar implicaciones relevantes que trascienden el plano operativo y se proyectan sobre la capacidad del sector de transformar sus modelos productivos hacia sistemas más eficientes, sostenibles y competitivos. Estas

implicaciones, sintetizadas desde el enfoque mixto de la investigación, se agrupan en tres dimensiones fundamentales: técnica, económica y ambiental.

Implicaciones técnicas

Los resultados evidencian que la adopción de subproductos industriales en la producción de cementos compuestos o mezclas de concreto requiere estandarizar procesos y parámetros de calidad, especialmente cuando se trabaja con residuos no tradicionales o con alta variabilidad. La literatura y las normas técnicas consultadas (ASTM C618; NTC 1512; EN 197-1) subrayan la importancia de:

- Definir protocolos claros de muestreo, secado, molienda y homogenización.
- Garantizar el cumplimiento de requisitos químicos como el contenido de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 70\%$.
- Controlar la pérdida por ignición, finura Blaine y reactividad puzolánica.
- Asegurar consistencia entre lotes y trazabilidad del material desde su origen.
- Implementar sistemas de QA/QC robustos en cada etapa de la cadena.

La ausencia de estas estandarizaciones podría generar inestabilidad en las resistencias mecánicas, afectación en la trabajabilidad y riesgos de rechazo de lote, lo cual confirma que el componente técnico es el pilar central para la consolidación del modelo operativo.

Implicaciones económicas

Los análisis cuantitativos y documentales muestran que la valorización de subproductos tiene un impacto económico positivo a lo largo de toda la cadena de valor. Coincidiendo con González et al. (2021), la sustitución parcial del clínker —insumo intensivo en energía, emisiones y costos— genera ahorros entre el 6% y el 18% en procesos cementantes y concreteros. A ello se suman otras implicaciones económicas relevantes:

- Disminución de costos de disposición final para los generadores, quienes convierten un pasivo en un activo.
- Estabilidad de costos para plantas de concreto, al diversificar fuentes de suministro y reducir dependencia de materiales tradicionales.
- Apertura de nuevos mercados para gestores y pretratadores que participan en la transformación de subproductos.
- Mejoras en competitividad como resultado de la reducción de costos logísticos y operativos en rutas cortas (<30 km).

En síntesis, la adopción de subproductos no solo genera ahorros directos, sino que también crea oportunidades económicas asociadas a la circularidad, la innovación y la eficiencia operativa.

Implicaciones ambientales

Desde la perspectiva ambiental, la evidencia empírica y documental demuestra que el modelo contribuye de manera significativa a la transición hacia sistemas productivos más sostenibles. La reducción del contenido de clínker —principal responsable de las emisiones de CO₂ en el cemento— representa uno de los beneficios ambientales más importantes. Este resultado es coherente con la visión de la Ellen MacArthur Foundation (2019), que plantea la economía circular como una estrategia fundamental para disminuir las presiones sobre los ecosistemas.

Las implicaciones ambientales más relevantes incluyen:

- Reducción directa de emisiones de CO₂, al evitar procesos de calcinación y disminuir consumo energético.
- Disminución de residuos enviados a rellenos sanitarios, lo cual reduce impactos sobre suelos, paisajes y cuerpos de agua.
- Menor extracción de materias primas vírgenes, al sustituir arenas, calizas o arcillas con materiales secundarios.

- Mayor eficiencia en el uso de recursos, alineada con los ODS 9, 11, 12 y 13.
- Impulso a prácticas de circularidad, fortaleciendo los compromisos ambientales del sector cementero colombiano.

Conclusiones

Los sectores termoeléctrico, siderúrgico, minero y agroindustrial generan subproductos con características físico-químicas compatibles con la sustitución parcial del clínker, destacándose cenizas volantes, cenizas de biomasa y finos de trituración como los materiales más constantes en volumen, composición y continuidad operacional.

La disponibilidad de residuos en Cundinamarca es suficiente para modelos de sustitución escalonada (10–25%), sustentada en volúmenes mensuales estables (210 t/mes de cenizas; 145 t/mes de finos; 320 t/mes de relaves) y una proximidad geográfica favorable, con el 88% de los generadores ubicados a menos de 30 km de plantas de concreto.

Las principales cementeras de la región —CEMEX, Argos y Holcim-Geocycle— disponen de capacidades técnicas avanzadas, infraestructura de laboratorio y experiencia comprobada en la utilización de materiales cementantes suplementarios, lo que demuestra que la tecnología requerida ya está instalada en el territorio.

Las plantas de concreto muestran un alto interés en incorporar subproductos (promedio > 4.0/5), pero la adopción depende de la calidad del material, como evidencia el coeficiente correlacional $r = 0.71$. Existen brechas técnicas entre grandes cementeras y plantas medianas/pequeñas, lo que evidencia la necesidad de estandarización y acompañamiento técnico para garantizar implementación segura.

La industria del concreto en Cundinamarca posee la experiencia y disposición necesarias para incorporar subproductos industriales, aunque requiere mecanismos de articulación y estandarización para asegurar una adopción masiva, estable y técnicamente confiable.

El uso de subproductos es económicamente favorable: los generadores eliminan costos de disposición (hasta \$120.000/t) y las cementeras obtienen ahorros entre 6% y 18% al reducir el consumo de clínker, coherente con la literatura internacional y los análisis realizados en este estudio.

Las condiciones logísticas del departamento —rutas cortas ≤ 30 km y alta cercanía entre nodos de generación y consumo— permiten mantener costos de transporte competitivos y facilitan la consolidación de un mercado secundario regulado, siempre que exista estandarización y acuerdos formales de suministro.

El estudio demuestra que la incorporación de subproductos industriales en la industria del concreto de Cundinamarca es técnica, económica, logística y ambientalmente viable. La región cuenta con disponibilidad material, infraestructura industrial, capacidades técnicas instaladas y un ecosistema empresarial receptivo. Sin embargo, el éxito del modelo depende de fortalecer la estandarización de la calidad, desarrollar lineamientos normativos específicos y construir mecanismos de articulación entre generadores, plantas de concreto, cementeras y entidades regulatorias. La adopción sistemática de subproductos permitiría avanzar hacia una economía circular robusta, con beneficios en competitividad, reducción de emisiones y eficiencia operativa en el sector cementero colombiano.

Lista de referencias

1. . Alcaldía de Mosquera. (2021). *Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos – PGIRS 2021–2035*. <https://www.mosquera-cundinamarca.gov.co/>
2. Alcaldía Mayor de Bogotá. (2023). *Decreto 507 de 2023 – Política Pública Distrital de Economía Circular*. <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/ambiente/ambiente-y-sostenibilidad/decreto-507-de-2023-economia-circular-en-bogota>
3. Alliance for Low-Carbon Cement & Concrete. (2023). *Factsheet on supplementary cementitious materials*. <https://alliancelccc.com/>
4. Amran, M., Murali, G., Fediuk, R., & Ozbakkaloglu, T. (2021). Fly ash-based eco-efficient concretes: A comprehensive review. *Materials*, 14(2), 360. <https://doi.org/10.3390/ma14020360>
5. Argos. (2022). *Informe integrado 2022*. <https://www.argos.co/informe-integrado-2022/>
6. ASTM International. (2019). *ASTM C618-19: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. ASTM.
7. ASTM International. (2022). *ASTM C989/C989M-22: Standard Specification for Slag Cement for Use in Concrete and Mortars*. ASTM.
8. Ballou, R. H. (2018). *Logística: administración de la cadena de suministro*. Pearson.
9. Barbhuiya, S. (2023). Limestone calcined clay cements (LC3): A review. *Journal of Cleaner Production*, 401, 136948. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136948>
10. Berenguer, R., et al. (2021). Cement-based materials: Pozzolanic activities of mineral admixtures. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00642. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00642>
11. CEMBUREAU. (2024). *Activity Report 2023*. <https://cembureau.eu/>

12. Cementos Pacasmayo. (2023). *Informe de sostenibilidad 2023*.
<https://www.cementospacasmayo.com.pe/>
13. CEMEX Colombia. (2023). *Reporte integrado 2023*. <https://www.cemexcolombia.com/>
14. DANE. (2020). *Encuesta Anual Manufacturera 2020*. Departamento Administrativo Nacional de Estadística. <https://www.dane.gov.co>
15. ECOS – Environmental Coalition on Standards. (2024). *Moving to performance-based cement and concrete standards: An international perspective*. <https://ecostandard.org/>
16. Ellen MacArthur Foundation. (2019). *Completing the picture: How the circular economy tackles climate change*. EMF.
17. European Commission. (2020). *A new Circular Economy Action Plan for a cleaner and more competitive Europe (COM(2020) 98 final)*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0098>
18. European Committee for Standardization. (2011). *EN 197-1: Cement – Composition, specifications and conformity criteria for common cements*. CEN.
19. García, J. A. (2021). Ultra-high-performance concrete with local high unburned carbon fly ash [Preprint]. ResearchGate.
20. González, J., Rojas, M., & Pérez, H. (2021). Aprovechamiento de subproductos industriales en cementos compuestos. *Revista Ingeniería y Región*, 19(2), 45–63.
21. Hernández, M., Medina, C., & Frías, M. (2023). Economic feasibility of using supplementary cementitious materials in concrete production: A review. *Journal of Building Engineering*, 68, 106191. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106191>
22. Holcim (Colombia) S. A. (2022). *Informe de sostenibilidad 2022*.
<https://www.holcim.com.co/>
23. ICONTEC. (2014). *NTC 121: Cemento Portland. Especificaciones*. ICONTEC.
24. ICONTEC. (2014). *NTC 321: Cemento Portland – Métodos de ensayo*. ICONTEC.

25. ICONTEC. (2014). *NTC 1512: Materiales puzolánicos naturales y artificiales*.
ICONTEC.
26. Isaza-Ruiz, C., Lasso-Juárez, J., & Peña-Sarmiento, S. (2023). Relaves mineros como materias primas secundarias en la fabricación de cemento hidráulico. *DYNA*, 90(226), 70–78.
<https://doi.org/10.15446/dyna.v90n226.107370>
27. Joint Research Centre. (2022). *Decarbonisation options for the cement industry (JRC131246)*. Publications Office of the EU.
<https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC131246>
28. Kolawole, J. T., et al. (2021). Use of sugarcane bagasse ash in self-compacting concrete: A review. *Construction Materials*, 174(6), 253–270.
<https://doi.org/10.1680/jcoma.20.00034>
29. Loma Negra. (2023). *Reporte de sustentabilidad 2023*. <https://www.lomanegra.com.ar/>
30. Malhotra, V. M., & Mehta, P. K. (2005). *High performance high volume fly ash concrete: Material, mixture proportioning, properties, construction practice and case histories*.
Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development.
31. Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, properties and materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
32. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2019). *Estrategia Nacional de Economía Circular (ENEC)*. <https://www.minambiente.gov.co/economia-circular/>
33. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). *Política nacional para la gestión de residuos sólidos*. Gobierno de Colombia. <https://www.minambiente.gov.co>
34. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022). *Estrategia Nacional de Economía Circular – ENEC*. <https://www.minambiente.gov.co>
35. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2023). *Decreto 507 de 2023*.
<https://www.minambiente.gov.co>

36. Muñoz-Pérez, J. H., et al. (2024). Caracterización química y físico-mecánica de la ceniza volante generada en Termopaipa. *Revista de la UPTC (Ingeniería)*.
<https://doi.org/10.19053/01211129.17544>
37. Nogueira, F., Lima, R., & Silva, C. (2022). Utilization of blast furnace slag in Brazilian cement. *Construction and Building Materials*, 315, 125678.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125678>
38. Pinheiro, V. D., Cordeiro, G. C., & Nogueira, R. (2024). Pozzolanic potential of calcined clays for sustainable cement production. *Case Studies in Construction Materials*, 22, e02171.
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02171>
39. Pérez, H., & Rojas, M. (2022). Potencial de valorización de subproductos industriales en Colombia. *Revista Ambiente & Desarrollo*, 26(1), 34–52.
40. Ram, A. K., et al. (2022). State of the art review on physiochemical and engineering properties of fly ash. *International Journal of Coal Science & Technology*, 9, 1–27.
<https://doi.org/10.1007/s40789-022-00472-6>
41. Scrivener, K., John, V., & Gartner, E. (2018). Eco-efficient cements: Potential, economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, 114, 2–26. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>
42. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT]. (2023). *Informe nacional de producción más limpia en la industria del cemento*. Gobierno de México.
<https://www.gob.mx/semarnat>
43. Strybny, M., et al. (2024). Calcined clays as concrete additive: Performance and durability. *Construction and Building Materials*, 407, 133340.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133340>

44. Thomas, B. S. (2021). Sugarcane bagasse ash as a supplementary cementitious material in concrete—A review. *Cleaner Materials*, 1, 100007.
<https://doi.org/10.1016/j.clema.2021.100007>
45. Torres, J., Andrade, C., & López, J. (2021). Propiedades puzolánicas de residuos industriales. *Materials Research*, 24(3), 1–10.
46. UAESP. (2022). *Economía circular en Bogotá*. <https://www.uaesp.gov.co/>
47. U.S. ASTM International. (2019). *ASTM C618 – Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. ASTM.
48. Valencia-Saavedra, W. G., Cruz-Noguera, S., & Mejía-de-Gutiérrez, R. (2021). Propiedades de ingeniería de concretos híbridos activados alcalinamente a largas edades. *Revista UIS Ingenierías*, 20(4), 189–204. <https://doi.org/10.18273/revuin.v20n4-2021020>