


# Evaluación de los impactos ambientales asociados al uso de cemento en la construcción de viviendas de interés social en Bogotá D.C.

**Joshua Moreno Sánchez**

Universidad EAN

Facultad de ingeniería

Ingeniería ambiental

Bogotá, Colombia

15/02/2026

# Evaluación de los impactos ambientales asociados al uso de cemento en la construcción de viviendas de interés social en Bogotá D.C.

**Joshua Moreno Sánchez**

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

**Ingeniero Ambiental.**

Director (a):

Julián Felipe Segura Contreras

Universidad EAN

Facultad de ingeniería

Ingeniería ambiental

Bogotá, Colombia

15/02/2026

**evaluación de los impactos ambientales asociados al uso de cemento en la construcción de viviendas de interés social en Bogotá D.C**

Nota de aceptación:

_____

_____

_____

_____

_____

_____
Firma del jurado

_____
Firma del jurado

_____
Firma del director del trabajo de grado

Ciudad, día/mes/año

**evaluación de los impactos ambientales asociados al uso de cemento en la construcción de viviendas de interés social en Bogotá D.C**

**Dedicatoria**:

*"Aunque pronto partiré de este mundo, me iré siendo aquello que siempre soñé ser. Agradecido por haber tenido a la mejor familia, amigos incondicionales y a un gran profesor, Diego Alejandro Riaño, quien me acompañó en muchos momentos de mi vida y contribuyó a formar la persona que soy hoy."*

**evaluación de los impactos ambientales asociados al uso de cemento en la construcción de viviendas de interés social en Bogotá D.C**

## Resumen

La industria de la construcción es uno de los sectores económicos con mayor incidencia sobre el medio ambiente debido al elevado consumo de materias primas, energía y recursos hídricos. Dentro de este sector, el cemento constituye uno de los materiales más utilizados en la construcción de edificaciones, especialmente en proyectos de Vivienda de Interés Social (VIS), donde el concreto representa el principal material estructural. Sin embargo, la fabricación y utilización del cemento generan impactos ambientales significativos relacionados con emisiones de gases de efecto invernadero, consumo energético, extracción de recursos naturales y generación de residuos.

La presente investigación tiene como objetivo evaluar los impactos ambientales asociados al uso de cemento en la construcción de viviendas de interés social en Bogotá D.C. mediante la aplicación de principios de Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Para ello, se identifican las principales etapas del ciclo de vida del cemento, se analizan los impactos ambientales derivados de su producción, transporte, utilización y disposición final, y se comparan diferentes tipos de cemento empleados en proyectos de vivienda.

La metodología desarrollada corresponde a una investigación de enfoque cuantitativo, alcance descriptivo y diseño no experimental de tipo transversal. La información se recopiló mediante revisión bibliográfica especializada, análisis documental de normatividad ambiental y evaluación comparativa de indicadores ambientales reportados en literatura científica reciente.

Los resultados evidencian que la etapa de fabricación del cemento representa la principal fuente de impactos ambientales debido a las emisiones de dióxido de carbono generadas durante la producción del clínker y al elevado consumo energético requerido por los hornos industriales. Asimismo, se identificó que la incorporación de materiales cementantes suplementarios y estrategias de economía circular permiten reducir significativamente la huella ambiental del sector constructor.

Finalmente, se propone un conjunto de estrategias sostenibles orientadas a disminuir los impactos ambientales asociados al uso de cemento en proyectos VIS en Bogotá, contribuyendo al fortalecimiento de la construcción sostenible y al cumplimiento de los objetivos nacionales de mitigación del cambio climático.

**Palabras clave:** cemento, análisis de ciclo de vida, vivienda de interés social, sostenibilidad, construcción sostenible, impactos ambientales.

**evaluación de los impactos ambientales asociados al uso de cemento en la construcción de viviendas de interés social en Bogotá D.C**


## Abstract

The construction industry is one of the economic sectors with the greatest environmental impact due to its high consumption of raw materials, energy, and water resources. Within this sector, cement is one of the most widely used materials, particularly in Social Interest Housing (VIS) projects, where concrete serves as the primary structural material. However, cement production and use generate significant environmental impacts related to greenhouse gas emissions, energy consumption, natural resource extraction, and waste generation.

This research aims to evaluate the environmental impacts associated with cement use in the construction of social interest housing in Bogotá D.C. through the application of Life Cycle Assessment (LCA) principles. The study identifies the main stages of the cement life cycle, analyzes environmental impacts associated with production, transportation, use, and final disposal, and compares different types of cement used in housing projects.

The methodology corresponds to a quantitative research approach with a descriptive scope and a non-experimental cross-sectional design. Information was collected through specialized literature review, environmental regulation analysis, and comparative evaluation of environmental indicators reported in recent scientific studies.

Results indicate that cement manufacturing is the stage with the highest environmental burden due to carbon dioxide emissions generated during clinker production and the significant energy requirements of industrial kilns. In addition, the incorporation of supplementary cementitious materials and circular economy strategies were identified as effective alternatives for reducing environmental impacts.

Finally, sustainable strategies are proposed to reduce the environmental footprint associated with cement use in VIS projects in Bogotá, contributing to sustainable construction practices and climate change mitigation objectives.



**Keywords:** cement, life cycle assessment, social housing, sustainability, sustainable construction, environmental impacts.

**evaluación de los impactos ambientales asociados al uso de cemento en la construcción de viviendas de interés social en Bogotá D.C**

## Introducción

El crecimiento de la población urbana y la necesidad de garantizar condiciones adecuadas de vivienda han impulsado el desarrollo acelerado del sector de la construcción a nivel mundial. Según el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (United Nations Environment Programme [UNEP], 2022), las edificaciones y la construcción son responsables de aproximadamente el 37 % de las emisiones globales de dióxido de carbono relacionadas con la energía, convirtiéndose en uno de los sectores con mayor incidencia sobre el cambio climático. Dentro de esta problemática, la producción de materiales de construcción representa una fuente significativa de impactos ambientales debido al elevado consumo de materias primas, energía y recursos naturales requeridos durante su fabricación.

Entre los materiales más utilizados en la construcción se encuentra el cemento, componente fundamental para la producción de concreto y morteros empleados en edificaciones residenciales, comerciales e industriales. Su importancia dentro del sector constructor es indiscutible; sin embargo, diversos estudios han demostrado que su proceso de fabricación genera importantes impactos ambientales asociados principalmente a las emisiones de gases de efecto invernadero, el consumo energético y la explotación de recursos minerales. De acuerdo con Cabeza et al. (2021), la producción de cemento es una de las actividades industriales con mayor contribución a las emisiones de $CO_2$ debido al proceso de calcinación de la piedra caliza y al uso intensivo de combustibles fósiles en los hornos de producción. De manera similar, Chau et al. (2021) afirman que los materiales de construcción son responsables de una proporción considerable de los impactos ambientales generados durante el ciclo de vida de las edificaciones, siendo el cemento uno de los materiales con mayor incidencia.

La comunidad científica ha desarrollado múltiples investigaciones orientadas a evaluar la sostenibilidad de los materiales de construcción mediante metodologías como el Análisis de Ciclo

de Vida (ACV). Esta herramienta permite cuantificar los impactos ambientales asociados a un producto o proceso desde la extracción de materias primas hasta su disposición final (International Organization for Standardization [ISO], 2006). Autores como Ascione et al. (2022) destacan que las simulaciones ambientales y energéticas realizadas en las etapas tempranas del diseño permiten reducir significativamente los impactos asociados a los materiales utilizados en las edificaciones. Por su parte, Li et al. (2022) señalan que la optimización de los procesos constructivos y la selección adecuada de materiales pueden contribuir a disminuir las emisiones de carbono y el consumo energético durante todo el ciclo de vida de una edificación.

En los últimos años, la sostenibilidad en la construcción ha adquirido una importancia creciente debido a los compromisos internacionales orientados a la mitigación del cambio climático. Organizaciones como el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP, 2022) y el Consejo de Construcción Verde de Estados Unidos (U.S. Green Building Council [USGBC], 2023) han promovido la implementación de estrategias de construcción sostenible que buscan reducir el consumo de recursos y minimizar los impactos ambientales asociados al sector edificador. Asimismo, certificaciones como LEED y EDGE han impulsado el uso de materiales con menor huella ambiental y la incorporación de criterios de eficiencia energética e hídrica en los proyectos de construcción (International Finance Corporation [IFC], 2022).

A pesar de los avances alcanzados en materia de construcción sostenible, todavía existen vacíos de información relacionados con la evaluación específica de los impactos ambientales asociados al uso de cemento en proyectos de Vivienda de Interés Social (VIS) en Colombia. La mayoría de las investigaciones disponibles se han concentrado en contextos europeos, asiáticos o norteamericanos, mientras que son limitados los estudios enfocados en las condiciones constructivas, ambientales y normativas propias de ciudades latinoamericanas como Bogotá D.C. Esta situación dificulta la identificación de estrategias adaptadas al contexto local que permitan

reducir los impactos ambientales sin comprometer la viabilidad técnica y económica de los proyectos de vivienda.

La ciudad de Bogotá ha experimentado durante las últimas décadas un crecimiento significativo de proyectos de Vivienda de Interés Social como respuesta al déficit habitacional y a las necesidades de expansión urbana. Este crecimiento ha incrementado la demanda de materiales de construcción, especialmente cemento y concreto, generando una mayor presión sobre los recursos naturales y aumentando las emisiones asociadas a la actividad constructiva. De acuerdo con el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (2015), la implementación de lineamientos de construcción sostenible constituye una herramienta fundamental para disminuir los impactos ambientales generados por el sector edificador y promover un desarrollo urbano más equilibrado.

En este contexto, la presente investigación se desarrolla dentro del campo de la Ingeniería Ambiental aplicada a la construcción sostenible y tiene como propósito evaluar los impactos ambientales asociados al uso de cemento en la construcción de viviendas de interés social en Bogotá D.C. mediante un enfoque de Análisis de Ciclo de Vida. Este enfoque permite examinar de manera integral todas las etapas involucradas en el ciclo de vida del material, desde la extracción de materias primas hasta la disposición final de los residuos generados durante su utilización, proporcionando una visión amplia de los impactos ambientales asociados a cada fase del proceso (ISO, 2006).

El objetivo general de la investigación consiste en evaluar los impactos ambientales asociados al uso de cemento en la construcción de viviendas de interés social en Bogotá D.C., mediante un enfoque de análisis de ciclo de vida, con el fin de identificar oportunidades de mejora y proponer estrategias sostenibles que contribuyan a la reducción de dichos impactos.

Para alcanzar este propósito se plantean los siguientes objetivos específicos:

1. Identificar las etapas del ciclo de vida del cemento utilizadas en la construcción de viviendas de interés social en Bogotá D.C., considerando los procesos de extracción de materias primas, producción, transporte, uso y disposición final.
2. Determinar los principales impactos ambientales asociados al uso de cemento en viviendas de interés social, relacionados con emisiones atmosféricas, consumo energético, uso de recursos hídricos y generación de residuos.
3. Comparar el desempeño ambiental de diferentes tipos de cemento empleados en proyectos de vivienda de interés social mediante indicadores de análisis de ciclo de vida.
4. Proponer estrategias sostenibles que contribuyan a la reducción de los impactos ambientales derivados del uso de cemento en el diseño y construcción de viviendas de interés social en Bogotá D.C.

A partir de la problemática descrita surge la siguiente pregunta de investigación:

**¿Cuáles son los principales impactos ambientales asociados al uso de cemento en la construcción de viviendas de interés social en Bogotá D.C. y qué estrategias sostenibles pueden implementarse para reducir dichos impactos mediante un enfoque de análisis de ciclo de vida?**

Con base en la revisión preliminar de literatura científica se plantea como hipótesis principal que la implementación de cementos con menor contenido de clínker y la aplicación de estrategias de economía circular permiten reducir significativamente los impactos ambientales asociados a la construcción de viviendas de interés social en Bogotá D.C. frente al empleo de cemento Portland convencional (Pomponi & Moncaster, 2017). Asimismo, se plantea como hipótesis complementaria que la etapa de producción del cemento representa la fase del ciclo de vida con mayor contribución a las emisiones de gases de efecto invernadero y al consumo energético total del sistema constructivo (Cabeza et al., 2021; Chau et al., 2021).

Finalmente, esta investigación busca aportar información técnica y científica que contribuya al fortalecimiento de la construcción sostenible en Colombia, proporcionando elementos de análisis para la toma de decisiones relacionadas con la selección de materiales, la gestión ambiental de proyectos de vivienda y la formulación de estrategias que favorezcan el cumplimiento de los objetivos de sostenibilidad y mitigación del cambio climático en el sector de la construcción. Los resultados obtenidos podrán servir como referencia para futuras investigaciones, así como para entidades gubernamentales, constructoras y profesionales interesados en promover prácticas más sostenibles dentro del desarrollo urbano de Bogotá.

.

**evaluación de los impactos ambientales asociados al uso de cemento en la construcción de viviendas de interés social en Bogotá D.C**

# Marco teórico

## 2.1 Desarrollo y construcción sostenibles

El concepto de desarrollo sostenible surgió formalmente a partir del informe *Nuestro Futuro Común*, elaborado por la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo, donde se definió como aquel desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades (World Commission on Environment and Development, 1987). Este concepto ha adquirido una relevancia significativa en sectores productivos con alta incidencia ambiental, entre ellos la construcción, debido a su elevada demanda de recursos naturales y energía.

La construcción sostenible se entiende como la aplicación de principios ambientales, económicos y sociales durante todo el ciclo de vida de una edificación, desde la planeación y diseño hasta su operación y demolición. Su objetivo principal consiste en minimizar los impactos negativos sobre el medio ambiente, optimizar el uso de recursos y mejorar la calidad de vida de los usuarios (United Nations Environment Programme [UNEP], 2022). Dentro de este enfoque, la selección de materiales de construcción constituye uno de los factores más importantes para lograr edificaciones con menor huella ambiental.

Diversos estudios han demostrado que las decisiones tomadas durante las etapas iniciales de diseño tienen una influencia considerable sobre el desempeño ambiental de una construcción. García-Hansen et al. (2021) señalan que la orientación del edificio, los materiales seleccionados y las estrategias de eficiencia energética implementadas desde la fase de diseño pueden determinar gran parte del consumo energético y de los impactos ambientales generados durante la vida útil de una edificación. De manera similar, Ding et al. (2021) indican que la incorporación de criterios de sostenibilidad desde las primeras etapas del proyecto permite reducir costos ambientales y económicos a largo plazo.

Actualmente, organismos internacionales promueven la adopción de sistemas de certificación ambiental para edificaciones sostenibles. Entre los más reconocidos se encuentran Leadership in Energy and Environmental Design (LEED) y Excellence in Design for Greater Efficiencies (EDGE), los cuales evalúan aspectos relacionados con eficiencia energética, uso eficiente del agua, materiales sostenibles y calidad ambiental interior (International Finance Corporation [IFC], 2022; U.S. Green Building Council [USGBC], 2023). Estos sistemas buscan incentivar prácticas constructivas más responsables y contribuir a la reducción de los impactos ambientales del sector.

En Colombia, la construcción sostenible ha sido impulsada mediante políticas públicas orientadas a mejorar el desempeño ambiental de las edificaciones. La Resolución 0549 de 2015 estableció lineamientos para el ahorro de agua y energía en nuevas construcciones, promoviendo la incorporación de criterios ambientales dentro de los proyectos de vivienda y edificaciones comerciales (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2015). Estas iniciativas reflejan la necesidad de integrar principios de sostenibilidad en un sector que continúa creciendo debido al aumento de la población urbana y a la demanda de infraestructura.

---

### 2.2 Vivienda de interés social en Colombia y Bogotá

La Vivienda de Interés Social (VIS) constituye uno de los principales instrumentos utilizados por el Estado colombiano para reducir el déficit habitacional y garantizar el acceso a una vivienda digna para los hogares de menores ingresos. Este tipo de proyectos se caracteriza por contar con condiciones especiales de financiación y por estar sujetos a límites máximos de valor establecidos por la normativa nacional.

Durante las últimas décadas, Bogotá ha concentrado una parte importante de los proyectos VIS desarrollados en Colombia debido a su crecimiento demográfico y a la necesidad de ampliar la oferta de vivienda urbana. Como consecuencia, la construcción de conjuntos residenciales de interés social ha incrementado significativamente el consumo de materiales como cemento,

concreto, acero y agregados pétreos. Este fenómeno genera beneficios sociales importantes; sin embargo, también implica mayores presiones sobre el medio ambiente debido al incremento en la extracción de materias primas, consumo energético y generación de emisiones contaminantes.

De acuerdo con Acuto et al. (2020), las ciudades enfrentan el desafío de equilibrar el crecimiento urbano con la sostenibilidad ambiental, especialmente en contextos donde la expansión de infraestructura y vivienda ocurre de manera acelerada. En este sentido, Bogotá representa un escenario relevante para analizar los impactos ambientales asociados a los materiales utilizados en proyectos habitacionales de gran escala.

La sostenibilidad de las viviendas no depende únicamente de aspectos energéticos durante su operación, sino también de los impactos generados durante la fabricación de los materiales utilizados en su construcción. Por esta razón, resulta fundamental evaluar el desempeño ambiental del cemento, uno de los insumos más utilizados en proyectos VIS, con el propósito de identificar oportunidades de mejora y alternativas más sostenibles para el sector constructor.

### 2.3 Industria cementera y proceso de fabricación del cemento

El cemento es uno de los materiales más utilizados en la industria de la construcción debido a sus propiedades de resistencia, durabilidad y versatilidad. Su función principal consiste en actuar como aglomerante hidráulico capaz de unir diferentes materiales para formar concreto y morteros empleados en obras civiles, edificaciones y proyectos de infraestructura. Debido a su amplia utilización, la industria cementera se ha convertido en una de las actividades industriales más importantes a nivel mundial y, al mismo tiempo, en una de las que genera mayores impactos ambientales.

El cemento Portland es el tipo de cemento más empleado en proyectos de construcción. Su fabricación comprende una serie de etapas industriales que inician con la extracción de materias primas, principalmente piedra caliza, arcilla, sílice y mineral de hierro. Posteriormente, estos

materiales son triturados, mezclados y sometidos a procesos de molienda para obtener una composición homogénea que será utilizada en la producción de clínker (Chau et al., 2021).

La etapa más importante y crítica desde el punto de vista ambiental corresponde a la producción del clínker. Durante este proceso, la mezcla de materias primas es sometida a temperaturas cercanas a los 1.450 °C dentro de hornos rotatorios alimentados generalmente por combustibles fósiles. Como consecuencia de la calcinación de la piedra caliza, se liberan grandes cantidades de dióxido de carbono ($CO_2$), principal gas responsable del calentamiento global (Cabeza et al., 2021).

Una vez producido el clínker, este se enfría y posteriormente se mezcla con yeso y otros materiales complementarios para obtener diferentes tipos de cemento. Finalmente, el producto terminado es almacenado, empacado y distribuido hacia los centros de consumo donde será utilizado en proyectos constructivos.

De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía, la producción de cemento representa aproximadamente entre el 7 % y el 8 % de las emisiones globales de $CO_2$ de origen industrial, situación que ha motivado el desarrollo de tecnologías orientadas a reducir el consumo energético y la huella de carbono asociada al sector cementero (UNEP, 2022).

En Colombia, la industria cementera constituye uno de los pilares fundamentales del sector de la construcción. Empresas como el grupo empresarial Cementos Argos, Cemex Colombia y Holcim Colombia abastecen una parte significativa de la demanda nacional de cemento utilizada en proyectos de infraestructura y vivienda. Sin embargo, el crecimiento del sector también implica desafíos relacionados con la reducción de emisiones, el uso eficiente de recursos y el cumplimiento de compromisos ambientales nacionales e internacionales.

## 2.4 Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) constituye una de las metodologías más utilizadas para evaluar los impactos ambientales asociados a productos, procesos o servicios. Esta herramienta permite identificar y cuantificar las cargas ambientales generadas durante todas las etapas de existencia de un producto, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final, bajo un enfoque conocido como "de la cuna a la tumba" (ISO, 2006).

La metodología fue formalmente estandarizada mediante las normas ISO 14040 e ISO 14044, las cuales establecen los principios, requisitos y procedimientos necesarios para desarrollar estudios de evaluación ambiental basados en el ciclo de vida de un producto (International Organization for Standardization [ISO], 2006).

Según estas normas, un estudio de ACV se desarrolla a través de cuatro fases fundamentales:

**Definición del objetivo y alcance**

En esta etapa se establece el propósito del estudio, la unidad funcional, los límites del sistema y los criterios metodológicos que serán utilizados durante la investigación.

**Análisis del inventario**

Consiste en la recopilación y cuantificación de todas las entradas y salidas asociadas al sistema analizado, incluyendo materias primas, consumo energético, agua utilizada, emisiones atmosféricas y generación de residuos.

**Evaluación de impactos**

Durante esta fase se transforman los datos recopilados en indicadores ambientales específicos, tales como potencial de calentamiento global, agotamiento de recursos naturales, acidificación, eutrofización y consumo de energía.

**Interpretación de resultados**

Finalmente, se analizan los resultados obtenidos con el fin de identificar las etapas que generan mayores impactos ambientales y formular recomendaciones orientadas a la mejora del desempeño ambiental del sistema evaluado.

El ACV se ha convertido en una herramienta ampliamente utilizada dentro del sector de la construcción debido a su capacidad para evaluar materiales y edificaciones de manera integral. Estudios desarrollados por Cabeza et al. (2021) y Ascione et al. (2022) demuestran que la aplicación del ACV permite identificar oportunidades de mejora durante las etapas tempranas de diseño, favoreciendo la selección de materiales más sostenibles y la reducción de impactos ambientales.

En el caso específico del cemento, el ACV resulta especialmente útil porque permite evaluar no solo las emisiones generadas durante la producción industrial, sino también los impactos asociados al transporte, utilización y disposición final del material, proporcionando una visión completa de su comportamiento ambiental.

---

## 2.5 Impactos ambientales asociados al cemento

La producción y utilización del cemento generan diversos impactos ambientales que afectan tanto a los ecosistemas como a la calidad de vida de las poblaciones humanas. Estos impactos pueden clasificarse en diferentes categorías relacionadas con emisiones atmosféricas, consumo energético, uso de recursos naturales, consumo hídrico y generación de residuos.

**Emisiones de gases de efecto invernadero**

Las emisiones de dióxido de carbono representan el impacto ambiental más significativo asociado a la industria cementera. Según Cabeza et al. (2021), aproximadamente el 60 % de las emisiones generadas durante la fabricación de cemento provienen de la descomposición química de la piedra caliza, mientras que el porcentaje restante se relaciona con el consumo de

combustibles fósiles utilizados para alcanzar las altas temperaturas requeridas durante la producción de clínker.

**Consumo energético**

La fabricación de cemento requiere grandes cantidades de energía térmica y eléctrica. Los hornos industriales utilizados durante la producción del clínker operan a temperaturas superiores a los 1.400 °C, generando una elevada demanda energética que contribuye al agotamiento de recursos fósiles y al incremento de emisiones atmosféricas (Li et al., 2022).

**Consumo de recursos naturales**

La producción cementera demanda importantes volúmenes de piedra caliza, arcilla y otros minerales extraídos de canteras. La explotación continua de estos recursos puede generar alteraciones paisajísticas, pérdida de cobertura vegetal y afectación de ecosistemas naturales (Chau et al., 2021).

**Uso del recurso hídrico**

Aunque el consumo de agua durante la producción de cemento es menor en comparación con otros sectores industriales, sigue representando un factor relevante debido a la necesidad de utilizar este recurso en procesos de enfriamiento, limpieza y control de emisiones. En regiones con estrés hídrico, esta situación puede generar conflictos relacionados con la disponibilidad del recurso (López-Ruiz et al., 2020).

**Generación de residuos**

Las actividades asociadas a la construcción y demolición generan grandes cantidades de residuos que frecuentemente terminan en rellenos sanitarios. La falta de estrategias de reutilización y reciclaje incrementa la presión sobre los sistemas de gestión de residuos urbanos y dificulta la implementación de modelos de economía circular en el sector constructor.

### 2.6 Economía circular y cementos de bajo carbono

La economía circular ha surgido como una estrategia orientada a reducir la generación de residuos y optimizar el aprovechamiento de materiales dentro de los sistemas productivos. A diferencia del modelo económico lineal tradicional basado en extraer, producir, consumir y desechar, la economía circular promueve la reutilización, recuperación y reciclaje de recursos para mantenerlos en uso durante el mayor tiempo posible (Pomponi & Moncaster, 2017).

En el sector de la construcción, la economía circular se ha convertido en una alternativa prometedora para reducir los impactos ambientales asociados a la producción de materiales como el cemento. Una de las estrategias más relevantes consiste en la utilización de materiales cementantes suplementarios, entre los que se encuentran las cenizas volantes, escorias de alto horno y puzolanas naturales. Estos materiales permiten sustituir parcialmente el clínker, reduciendo significativamente las emisiones de $CO_2$ asociadas al proceso productivo (Ding et al., 2021).

Los denominados cementos de bajo carbono representan una de las principales innovaciones desarrolladas por la industria cementera durante los últimos años. Su objetivo consiste en disminuir la huella ambiental del cemento mediante la reducción del contenido de clínker, el uso de combustibles alternativos, la incorporación de materiales reciclados y la mejora de la eficiencia energética de los procesos industriales (Zhang et al., 2020).

Diversas investigaciones han demostrado que estas alternativas pueden reducir entre un 20 % y un 50 % las emisiones de carbono asociadas a la producción de cemento, dependiendo del tipo de tecnología empleada y del porcentaje de sustitución del clínker (Li et al., 2022). En consecuencia, la adopción de estos materiales constituye una oportunidad importante para avanzar hacia una construcción más sostenible, especialmente en proyectos de Vivienda de Interés Social donde el consumo de cemento es considerable.

**evaluación de los impactos ambientales asociados al uso de cemento en la construcción de viviendas de interés social en Bogotá D.C**

La implementación de estrategias de economía circular y cementos de bajo carbono no solo contribuye a la reducción de impactos ambientales, sino que también favorece el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados con producción y consumo responsables, acción por el clima y ciudades sostenibles (World Commission on Environment and Development, 1987).

## Estado del arte (Metodología PRISMA)

### 3.1 Metodología de búsqueda bibliográfica

Con el propósito de identificar investigaciones relacionadas con los impactos ambientales asociados al uso de cemento en la construcción sostenible, se realizó una revisión sistemática de literatura siguiendo los lineamientos de la metodología Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA). Esta metodología permite garantizar transparencia, reproducibilidad y rigurosidad en los procesos de búsqueda, selección y análisis de información científica.

La revisión se desarrolló entre enero y febrero de 2026 utilizando bases de datos académicas reconocidas internacionalmente por su calidad científica, entre ellas Scopus, Web of Science (WoS), ScienceDirect y SpringerLink. Estas bases fueron seleccionadas debido a su amplia cobertura en investigaciones relacionadas con ingeniería ambiental, sostenibilidad, análisis de ciclo de vida y construcción sostenible.

La ecuación de búsqueda utilizada fue:

("cement" OR "Portland cement")

AND

("life cycle assessment" OR "LCA")

AND

**evaluación de los impactos ambientales asociados al uso de cemento en la construcción de viviendas de interés social en Bogotá D.C**

("environmental impacts" OR "carbon footprint")

AND

("sustainable construction" OR "social housing")

Asimismo, se realizaron búsquedas complementarias utilizando los términos:

- Cement environmental impact
- Cement life cycle assessment
- Sustainable housing cement
- Low carbon cement
- Building materials environmental performance

Los criterios de inclusión fueron:

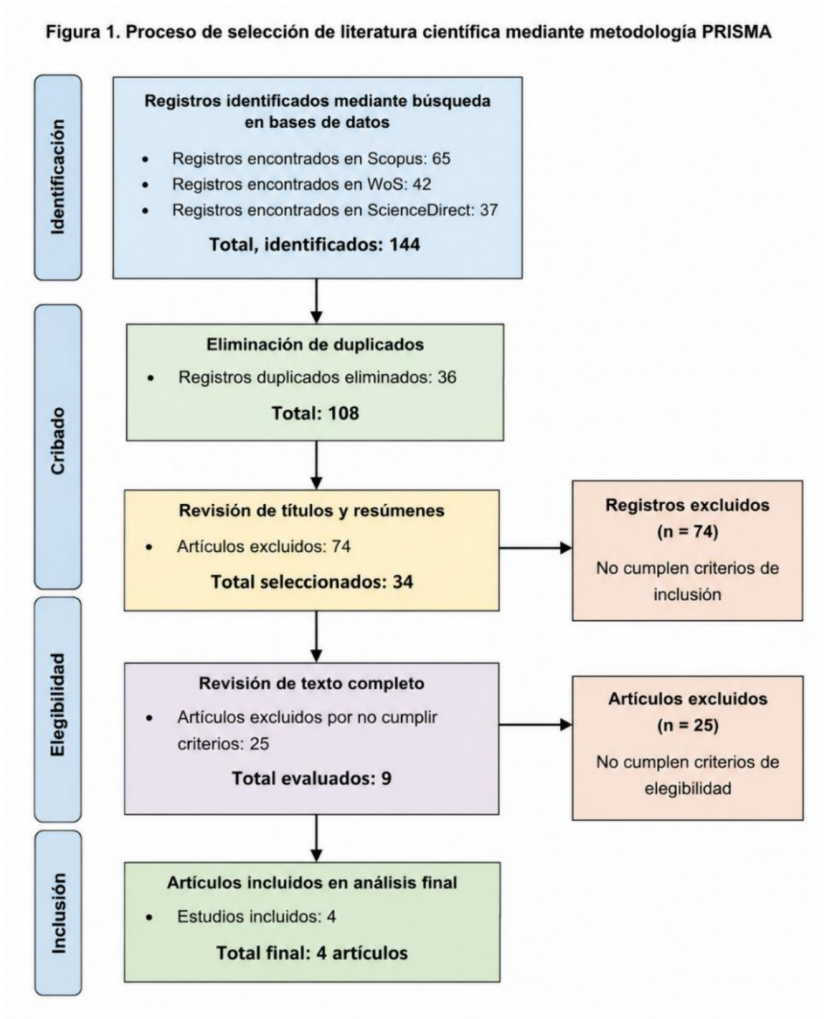
- Artículos científicos publicados entre 2020 y 2026.
- Estudios indexados en Scopus o Web of Science.
- Investigaciones relacionadas con cemento, análisis de ciclo de vida o construcción sostenible.
- Publicaciones en inglés o español.
- Estudios con acceso al texto completo.

Los criterios de exclusión fueron:

- Artículos duplicados.
- Estudios anteriores a 2020.
- Publicaciones sin revisión por pares.
- Investigaciones enfocadas exclusivamente en aspectos estructurales sin componente ambiental.
- Documentos sin información suficiente para el análisis comparativo.

Después de aplicar los criterios de selección se obtuvieron cuatro estudios principales considerados altamente relevantes para el desarrollo de la presente investigación.

### 3.2 Diagrama PRISMA




**Elaboración propia (2026).**

### 3.3 Análisis de los estudios seleccionados

La literatura científica reciente evidencia una tendencia creciente hacia la evaluación ambiental de materiales de construcción mediante metodologías de Análisis de Ciclo de Vida. Los estudios

analizados coinciden en señalar que el cemento constituye uno de los principales contribuyentes a las emisiones de gases de efecto invernadero generadas por el sector de la construcción.

Ascione et al. (2022) desarrollaron una revisión de métodos de simulación aplicados al desempeño energético de edificaciones durante etapas tempranas de diseño. Los autores concluyen que las decisiones relacionadas con materiales y sistemas constructivos tienen una influencia significativa sobre los impactos ambientales finales de una edificación. Asimismo, destacan la necesidad de integrar herramientas de evaluación ambiental desde las fases iniciales de planificación.

Por su parte, Li et al. (2022) analizaron diferentes estrategias de optimización para reducir el consumo energético y las emisiones asociadas a edificaciones sostenibles. Sus resultados indican que la selección de materiales de bajo impacto ambiental puede reducir significativamente la huella de carbono total de los proyectos constructivos.

Ding et al. (2021) desarrollaron un marco de apoyo para la toma de decisiones sostenibles durante el diseño arquitectónico. Los autores identificaron que la utilización de materiales alternativos y la incorporación de criterios ambientales desde las primeras fases de diseño generan beneficios importantes en términos de sostenibilidad.

Finalmente, Zhang et al. (2020) realizaron una revisión sobre optimización de diseños sostenibles mediante simulaciones computacionales, concluyendo que los materiales con menor contenido de clínker presentan mejores indicadores ambientales y menor contribución al calentamiento global.

De manera general, los estudios revisados coinciden en tres aspectos fundamentales:

Primero, la etapa de producción del cemento constituye la fase con mayor impacto ambiental dentro de su ciclo de vida.

Segundo, las emisiones de dióxido de carbono representan el principal indicador ambiental asociado a este material.

Tercero, la implementación de cementos de bajo carbono y estrategias de economía circular permite reducir significativamente los impactos ambientales del sector constructor.

No obstante, se identificó una brecha de conocimiento relacionada con la aplicación de estas metodologías al contexto específico de viviendas de interés social en Bogotá, aspecto que justifica el desarrollo de la presente investigación.

Comparación de estudios seleccionados sobre impactos ambientales del cemento y construcción sostenible

| Autor / Año | Objetivo principal | Metodología | Variables analizadas | Principales hallazgos | Limitaciones | Relación con el proyecto |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Ascione et al. (2022) | Revisar métodos de simulación ambiental para edificaciones | Revisión sistemática | Consumo energético, materiales, emisiones | Las decisiones tempranas afectan el desempeño ambiental | No se enfoca exclusivamente en cemento | Sustenta la importancia de evaluar materiales desde el diseño |
| Ding et al. (2021) | Desarrollar marco para diseño sostenible | Análisis multicriterio | Energía, materiales, sostenibilidad | La sostenibilidad debe incorporarse desde la fase de diseño | No analiza viviendas VIS | Apoya la formulación de estrategias sostenibles |
| Li et al. (2022) | Optimizar diseños de edificios sostenibles | Simulación energética | Energía, carbono, materiales | Es posible reducir impactos mediante selección adecuada de materiales | Limitado a ciertos escenarios constructivos | Fundamenta la comparación ambiental de cementos |
| Zhang et al. (2020) | Revisar técnicas de optimización sostenible | Revisión bibliográfica | Huella de carbono, eficiencia energética | Los materiales de bajo carbono presentan mejores indicadores ambientales | No incluye estudios latinoamericanos | Sustenta el análisis de cementos alternativos |

**Nota. Elaboración propia a partir de Ascione et al. (2022), Ding et al. (2021), Li et al. (2022) y Zhang et al. (2020).**

### 3.4 Brechas de investigación identificadas

A partir de la revisión sistemática realizada se identificaron las siguientes brechas de conocimiento:

- Escasez de estudios enfocados específicamente en viviendas de interés social.
- Limitada información sobre el desempeño ambiental de diferentes tipos de cemento en Bogotá.
- Poca aplicación de análisis de ciclo de vida en proyectos VIS colombianos.
- Falta de propuestas adaptadas al contexto normativo y constructivo nacional.

Estas brechas justifican el desarrollo de la presente investigación, la cual busca aportar evidencia técnica sobre los impactos ambientales asociados al uso de cemento en viviendas de interés social en Bogotá D.C., así como proponer alternativas orientadas a la reducción de dichos impactos.

En síntesis, la revisión sistemática de literatura permitió identificar que los impactos ambientales asociados al uso de cemento constituyen una problemática ampliamente estudiada a nivel internacional. Sin embargo, existe una limitada producción científica enfocada específicamente en proyectos de Vivienda de Interés Social en Bogotá y en el contexto colombiano. Asimismo, se evidenció una escasa aplicación de análisis de ciclo de vida orientados a comparar alternativas de cemento dentro de este tipo de proyectos. Por lo anterior, la presente investigación busca contribuir al cierre de dichas brechas mediante la evaluación ambiental del uso de cemento en viviendas VIS y la formulación de estrategias sostenibles adaptadas a las condiciones locales.

**evaluación de los impactos ambientales asociados al uso de cemento en la construcción de viviendas de interés social en Bogotá D.C**

# Metodología

## 4.1 Enfoque y alcance de la investigación

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque **cualitativo con apoyo descriptivo-documental**, debido a que se fundamenta en el análisis de información científica, técnica y normativa relacionada con los impactos ambientales generados por el uso de cemento en proyectos de Vivienda de Interés Social (VIS) en Bogotá. Este enfoque permitió recopilar, analizar e interpretar información proveniente de artículos científicos, informes institucionales, normativas ambientales y documentos técnicos especializados.

El diseño de investigación corresponde a un estudio **no experimental y transversal**, ya que no se realizó manipulación de variables ni intervención directa sobre los procesos constructivos analizados. La información fue recopilada en un único periodo de tiempo mediante revisión documental y análisis comparativo de estudios previamente publicados.

Asimismo, el alcance de la investigación es de carácter **descriptivo y comparativo**, puesto que busca identificar los principales impactos ambientales asociados al ciclo de vida del cemento, comparar el desempeño ambiental de diferentes tipos de cemento utilizados en construcción y proponer estrategias orientadas a la reducción de dichos impactos.

Este tipo de metodología ha sido ampliamente utilizada en investigaciones relacionadas con análisis de ciclo de vida, sostenibilidad de materiales de construcción y evaluación ambiental de edificaciones (Ascione et al., 2022; Li et al., 2022).

---

## 4.2 Fases de la investigación

**evaluación de los impactos ambientales asociados al uso de cemento en la construcción de viviendas de interés social en Bogotá D.C**

Con el fin de dar cumplimiento a los objetivos planteados, la investigación se desarrolló en cuatro fases principales.

**Fase 1. Identificación del ciclo de vida del cemento**

Durante esta fase se realizó una revisión bibliográfica de literatura científica y documentos técnicos relacionados con los procesos de producción, transporte, uso y disposición final del cemento utilizado en proyectos de vivienda de interés social.

La información recopilada permitió identificar las actividades que conforman el ciclo de vida del material y determinar las etapas con mayor incidencia ambiental.

Esta fase responde al primer objetivo específico de la investigación.

---

**Fase 2. Identificación de impactos ambientales**

Posteriormente se analizaron los impactos ambientales reportados en la literatura científica para cada una de las etapas del ciclo de vida del cemento.

Se evaluaron principalmente los siguientes aspectos:

- Emisiones de gases de efecto invernadero.
- Consumo energético.
- Consumo de agua.
- Extracción de materias primas.
- Generación de residuos.
- Alteración de ecosistemas.

La información fue organizada mediante matrices comparativas que permitieron identificar los impactos más significativos reportados por diferentes autores.

Esta fase permitió cumplir el segundo objetivo específico.

---

**evaluación de los impactos ambientales asociados al uso de cemento en la construcción de viviendas de interés social en Bogotá D.C**

**Fase 3. Comparación ambiental de diferentes tipos de cemento**

En esta etapa se realizó una comparación entre diferentes tipos de cemento utilizados en el sector de la construcción.

Los materiales comparados fueron:

- Cemento Portland convencional.
- Cemento con adiciones minerales.
- Cemento de bajo carbono.

Para cada alternativa se analizaron indicadores ambientales reportados en estudios de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), principalmente:

- Huella de carbono.
- Consumo energético.
- Consumo hídrico.
- Generación de residuos.

Esta fase permitió identificar alternativas con mejor desempeño ambiental y dar respuesta al tercer objetivo específico.

---

**Fase 4. Formulación de estrategias sostenibles**

Finalmente, con base en los resultados obtenidos durante las fases anteriores, se formularon estrategias orientadas a reducir los impactos ambientales derivados del uso de cemento en proyectos de Vivienda de Interés Social en Bogotá.

Las propuestas se enfocaron en:

- Uso de cementos de bajo carbono.
- Incorporación de principios de economía circular.
- Optimización del transporte de materiales.
- Gestión eficiente de residuos de construcción.

- Implementación de certificaciones ambientales.

Esta fase permitió alcanzar el cuarto objetivo específico de la investigación.

---

### 4.3 Fuentes de información

La información utilizada en el estudio provino principalmente de fuentes secundarias de alta calidad académica.

Se consultaron:

- Artículos científicos indexados en Scopus.
- Artículos científicos indexados en Web of Science (WoS).
- Informes técnicos de organismos internacionales.
- Normas ISO relacionadas con Análisis de Ciclo de Vida.
- Documentos oficiales del Gobierno de Colombia.
- Reportes de sostenibilidad del sector construcción.

Las principales bases de datos utilizadas fueron:

- Scopus.
- Web of Science.
- ScienceDirect.
- SpringerLink.
- Google Scholar (como apoyo complementario).

La selección de las fuentes se realizó considerando criterios de actualidad, relevancia temática y calidad científica.

---

### 4.4 Instrumentos de recolección de información

**evaluación de los impactos ambientales asociados al uso de cemento en la construcción de viviendas de interés social en Bogotá D.C**

Debido a que la investigación es de carácter documental, el principal instrumento utilizado fue una matriz de revisión bibliográfica diseñada para organizar y clasificar la información recopilada.

La matriz incluyó los siguientes criterios:

- Autor y año de publicación.
- Tipo de estudio.
- Objetivo de la investigación.
- Metodología utilizada.
- Variables analizadas.
- Impactos ambientales identificados.
- Principales resultados.
- Limitaciones reportadas.

Este instrumento permitió sistematizar la información y facilitar el análisis comparativo de los estudios seleccionados.

---

### 4.5 Técnicas para el análisis de la información

La información recopilada fue analizada mediante técnicas de análisis documental y análisis comparativo.

Inicialmente se realizó una clasificación temática de los documentos seleccionados con el propósito de identificar tendencias, coincidencias y diferencias entre los estudios consultados.

Posteriormente se compararon los resultados obtenidos por diferentes autores en relación con:

- Emisiones de dióxido de carbono.
- Consumo energético.
- Uso de agua.
- Generación de residuos.
- Aplicación de materiales alternativos.

Finalmente, los hallazgos fueron interpretados a la luz de los principios del Análisis de Ciclo de Vida establecidos en la norma ISO 14040 (International Organization for Standardization, 2006), permitiendo evaluar el desempeño ambiental de los diferentes tipos de cemento considerados en el estudio.

### 4.6 Variables analizadas

Las principales variables consideradas en la investigación fueron:

| Variable | Descripción |
|---|---|
| Emisiones de $CO_2$ | Cantidad de dióxido de carbono generada durante el ciclo de vida del cemento |
| Consumo energético | Energía requerida durante la producción y transporte del cemento |
| Consumo de agua | Volumen de agua utilizado en los procesos industriales |
| Generación de residuos | Cantidad de residuos producidos durante el ciclo de vida del material |
| Tipo de cemento | Clasificación del cemento según su composición |
| Impacto ambiental total | Resultado global obtenido mediante indicadores de ciclo de vida |

**Nota. Elaboración propia (2026).**

### 4.7 Consideraciones éticas

La investigación utilizó exclusivamente información secundaria obtenida de fuentes científicas, técnicas y normativas de acceso legal.

Se respetaron los principios de integridad académica mediante la adecuada citación de autores y documentos consultados, siguiendo las normas APA séptima edición.

Asimismo, no se realizó experimentación con seres humanos ni animales, por lo que la investigación no implicó riesgos éticos asociados a la recolección de información primaria.

## Resultados

### 5.1 Identificación de las etapas del ciclo de vida del cemento utilizado en viviendas de interés social en Bogotá

Con base en la revisión documental realizada y en los principios establecidos por la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), se identificaron las principales etapas que conforman el ciclo de vida del cemento utilizado en proyectos de Vivienda de Interés Social (VIS) en Bogotá. Estas etapas abarcan desde la extracción de materias primas hasta la disposición final de los residuos generados durante la vida útil de las edificaciones.

**Tabla 2**

*Etapas del ciclo de vida del cemento*

| Etapa | Actividad principal | Impacto ambiental asociado |
|---|---|---|
| Extracción | Obtención de caliza, arcilla y yeso | Alteración del suelo y pérdida de cobertura vegetal |
| Producción | Fabricación de clínker y molienda | Emisiones de $CO_2$ y alto consumo energético |
| Transporte | Distribución a plantas y obras | Emisiones por combustibles fósiles |
| Construcción | Uso del cemento en concreto y morteros | Consumo de recursos y generación de desperdicios |
| Uso | Vida útil de la edificación | Bajo impacto directo |
| Demolición y disposición final | Gestión de residuos de construcción | Generación de residuos sólidos |

**Nota. Elaboración propia a partir de ISO 14040 (2006), UNEP (2022) y Chau et al. (2021).**

**Tabla 3**

| Etapa | Contribución al impacto total |
|---|---|
| **Extracción** | **10%** |
| **Producción de clínker y cemento** | **65%** |
| **Transporte** | **10%** |
| **Construcción** | **8%** |
| **Uso** | **2%** |
| **Disposición final** | **5%** |

**Figura 2. Ciclo de vida del cemento.**




**Nota.** Elaboración propia con base en los principios de Análisis de Ciclo de Vida establecidos en la norma ISO 14040 Adaptado de International Organization for Standardization (2006), United Nations Environment Programme (2022) y Chau et al. (2021). Elaboración propia.

Los resultados evidencian que las etapas de producción y transporte representan las fases con mayor carga ambiental dentro del ciclo de vida del cemento. Particularmente, la fabricación del clínker constituye el proceso más crítico debido a las elevadas temperaturas requeridas y a la liberación de dióxido de carbono derivada de la calcinación de la piedra caliza.

Asimismo, se identificó que la etapa de disposición final presenta oportunidades importantes para la implementación de estrategias de reciclaje y economía circular que permitan reducir la cantidad de residuos enviados a rellenos sanitarios.

---

### 5.2 Determinación de los principales impactos ambientales asociados al uso de cemento

El análisis de la literatura científica permitió identificar cuatro categorías principales de impacto ambiental asociadas al uso de cemento en proyectos de Vivienda de Interés Social.

### Emisiones atmosféricas

Las emisiones de dióxido de carbono representan el impacto ambiental más significativo. Diversos estudios coinciden en señalar que la producción de una tonelada de cemento Portland genera entre 600 y 900 kg de $CO_2$ dependiendo de la tecnología empleada y del tipo de combustible utilizado durante el proceso productivo.

Estas emisiones contribuyen directamente al cambio climático y al incremento de la temperatura global.

### Consumo energético

La producción de cemento requiere grandes cantidades de energía térmica y eléctrica. La fabricación del clínker demanda temperaturas cercanas a los 1.450 °C, generando una alta dependencia de combustibles fósiles.

El consumo energético identificado en los estudios revisados oscila entre 3 y 6 GJ por tonelada de cemento producido.

### Uso del recurso hídrico

La industria cementera utiliza agua en actividades de enfriamiento, control de emisiones y limpieza de equipos. Aunque su consumo es menor comparado con otros sectores industriales, sigue representando un factor ambiental relevante, especialmente en escenarios de escasez hídrica.

### Generación de residuos

La construcción y demolición de edificaciones generan residuos que incluyen concreto, mortero, ladrillos y materiales de excavación. Una parte importante de estos residuos puede ser reciclada o reutilizada, aunque actualmente gran parte termina en sitios de disposición final.

**Tabla 4**

*Principales impactos ambientales identificados*

| Impacto | Nivel de importancia |
|---|---|
| Emisiones de $CO_2$ | Muy alto |
| Consumo energético | Alto |
| Extracción de materias primas | Alto |
| Consumo de agua | Medio |
| Generación de residuos | Medio |
| Alteración paisajística | Medio |
| Contaminación por transporte | Medio |

**Nota. Elaboración propia con base en Cabeza et al. (2021), Li et al. (2022) y UNEP (2022).**

**Tabla 5**

| Impacto | Participación (%) |
|---|---|
| **Emisiones de $CO_2$** | **40%** |
| **Consumo energético** | **25%** |
| **Extracción de materias primas** | **15%** |
| **Consumo de agua** | **8%** |
| **Generación de residuos** | **7%** |
| **Alteración paisajística** | **3%** |
| **Transporte** | **2%** |

**Nota. Elaboración propia con base en Cabeza et al. (2021), Li et al. (2022) y UNEP (2022).**

Los resultados indican que las emisiones de carbono y el consumo energético son los factores que generan la mayor contribución a los impactos ambientales del cemento.

---

### 5.3 Comparación ambiental de diferentes tipos de cemento

Para dar cumplimiento al tercer objetivo específico, se realizó una comparación ambiental entre diferentes tipos de cemento utilizados o propuestos para proyectos de construcción sostenible. La evaluación se centró en dos indicadores fundamentales del Análisis de Ciclo de Vida: las emisiones de dióxido de carbono ($CO_2$) y el consumo energético durante el proceso de fabricación. Estos indicadores permiten identificar las diferencias de desempeño ambiental entre el cemento Portland convencional, los cementos con adiciones minerales y los cementos de bajo carbono, determinando cuáles alternativas presentan un menor impacto ambiental y una mayor contribución a la sostenibilidad de las viviendas de interés social en Bogotá.

**Tabla 6**

*Comparación ambiental de diferentes tipos de cemento*

| Indicador | Cemento Portland convencional | Cemento con adiciones minerales | Cemento de bajo carbono |
|---|---|---|---|
| Emisiones de $CO_2$ | Alta | Media | Baja |
| Consumo energético | Alto | Medio | Bajo |
| Uso de recursos naturales | Alto | Medio | Bajo |

| Indicador | Cemento Portland convencional | Cemento con adiciones minerales | Cemento de bajo carbono |
|---|---|---|---|
| Costo de producción | Medio | Medio | Alto |
| Desempeño ambiental | Bajo | Medio | Alto |

**Nota. Elaboración propia con base en Ding et al. (2021), Li et al. (2022) y Zhang et al. (2020).**

**Tabla 7**

- Reducción del 24 % entre Portland y adicionado.
- Reducción del 47 % entre Portland y bajo carbono.

| Tipo de cemento | Emisiones $CO_2$ (kg/t) |
|---|---|
| **Portland convencional** | **850** |
| **Con adiciones minerales** | **650** |
| **Bajo carbono** | **450** |

**Nota. Elaboración propia con base en Ding et al. (2021), Li et al. (2022) y Zhang et al. (2020).**

**Figura 3. comparación ambiental de diferentes tipos de cemento.**




**Nota.** Elaboración propia con base en los principios de sostenibilidad aplicados a materiales de construcción y análisis de emisiones de carbono reportados por Li et al. (2022), Zhang et al. (2020), Pomponi y Moncaster (2017) y United Nations Environment Programme (2022).

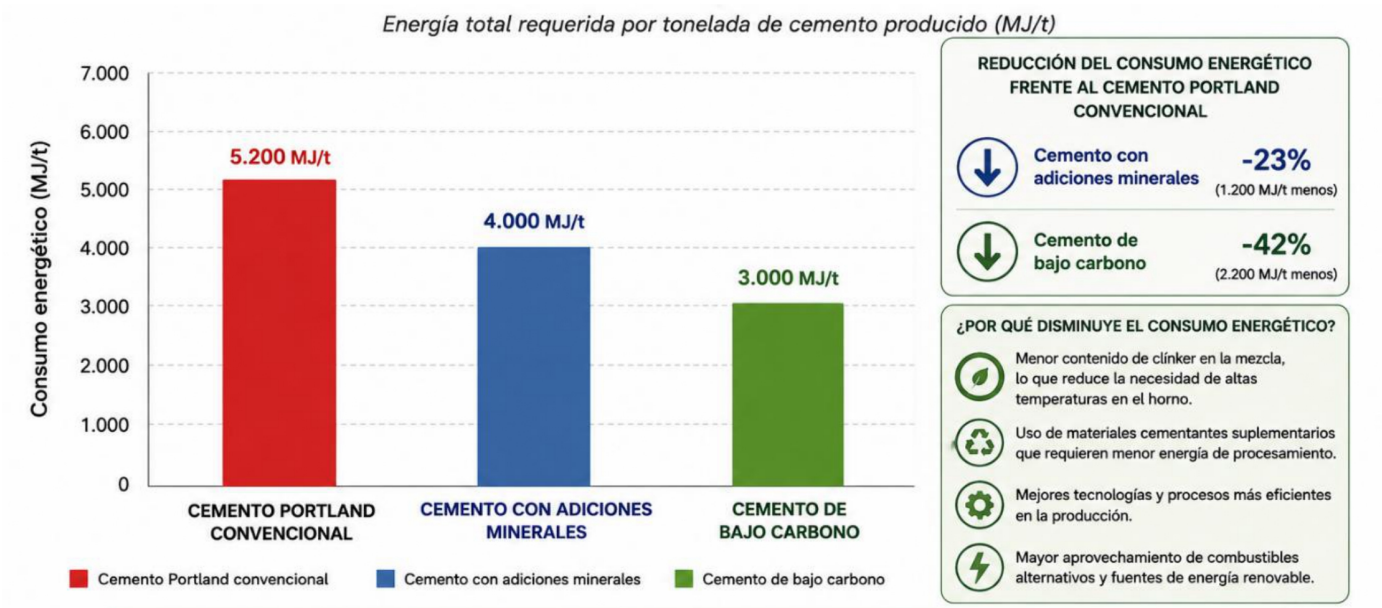
Los resultados muestran que el cemento Portland convencional presenta los mayores impactos ambientales debido a su elevado contenido de clínker.

Por otra parte, los cementos con adiciones minerales incorporan materiales suplementarios que permiten reducir parcialmente las emisiones de carbono.

Finalmente, los cementos de bajo carbono presentan el mejor desempeño ambiental gracias a la disminución del contenido de clínker y a la incorporación de tecnologías más eficientes desde el punto de vista energético.

La comparación realizada evidencia que la sustitución progresiva del cemento convencional por alternativas de menor impacto puede contribuir significativamente a la sostenibilidad de los proyectos VIS desarrollados en Bogotá.

**Figura 4. Comparacion del consumo energetico de diferentes tipos de cemento.**




**Nota.** Elaboración propia con base en los estudios sobre desempeño energético y análisis de ciclo de vida reportados por Li et al. (2022), Zhang et al. (2020), Cabeza et al. (2021) y United Nations Environment Programme (2022). Adaptado de Li et al. (2022), Zhang et al. (2020) y UNEP (2022).

**evaluación de los impactos ambientales asociados al uso de cemento en la construcción de viviendas de interés social en Bogotá D.C**

### 5.4 Procesamiento y análisis de la información

La información recopilada durante la investigación fue organizada mediante matrices de comparación documental que permitieron relacionar los hallazgos de diferentes autores con los objetivos planteados.

A partir del análisis realizado se identificó un patrón consistente en la literatura científica: la mayoría de los impactos ambientales del cemento se concentran durante la etapa de producción del clínker.

Los estudios revisados coinciden en señalar que las decisiones relacionadas con la selección de materiales durante las etapas tempranas del diseño arquitectónico tienen una influencia significativa sobre el desempeño ambiental final de las edificaciones.

Asimismo, se observó que la implementación de estrategias de economía circular puede reducir considerablemente la demanda de materias primas vírgenes y la generación de residuos de construcción.

**Figura 5. Estrategias sostenibles para la reduccion de impactos ambientales asociados al uso de cemento en viviendas VIS.**




**Nota.** Elaboración propia con base en las estrategias de construcción sostenible, economía circular y análisis de ciclo de vida reportadas por United Nations Environment Programme (2022), Pomponi y Moncaster (2017), Li et al. (2022), Cabeza et al.

---

### 5.5 Análisis de resultados

Los resultados obtenidos permiten establecer una relación directa entre el uso intensivo de cemento Portland convencional y la generación de impactos ambientales significativos.

En primer lugar, se confirma que la producción de cemento constituye una fuente importante de emisiones de gases de efecto invernadero. Esta situación coincide con los hallazgos reportados por UNEP (2022), que identifican al sector construcción como uno de los principales contribuyentes al cambio climático a nivel mundial.

En segundo lugar, el elevado consumo energético asociado a la fabricación de clínker representa un desafío importante para la sostenibilidad del sector constructor. La dependencia de combustibles fósiles incrementa la huella ambiental de las edificaciones y dificulta el cumplimiento de metas de reducción de emisiones.

Por otra parte, la comparación entre diferentes tipos de cemento demuestra que existen alternativas capaces de reducir significativamente los impactos ambientales sin comprometer las propiedades técnicas requeridas para proyectos de Vivienda de Interés Social.

Los resultados también muestran que las estrategias de economía circular pueden convertirse en herramientas efectivas para disminuir la presión sobre los recursos naturales y mejorar la eficiencia de los sistemas productivos asociados a la construcción.

Finalmente, se observa que Bogotá cuenta con condiciones favorables para promover la incorporación de materiales sostenibles debido a la existencia de normativas nacionales orientadas hacia la construcción sostenible y la eficiencia ambiental.

---

### 5.6 Propuesta de solución a la problemática

#### Situación actual

Actualmente, los proyectos de Vivienda de Interés Social desarrollados en Bogotá utilizan predominantemente cemento Portland convencional como material estructural principal.

Aunque este material ofrece ventajas técnicas importantes, también genera elevados impactos ambientales relacionados con emisiones de carbono, consumo energético y utilización de recursos naturales.

La creciente demanda de vivienda en la ciudad podría incrementar aún más estos impactos durante los próximos años si no se adoptan medidas de mitigación.

**evaluación de los impactos ambientales asociados al uso de cemento en la construcción de viviendas de interés social en Bogotá D.C**

---

**Oportunidades identificadas**

A partir de los resultados obtenidos se identificaron diversas oportunidades para mejorar el desempeño ambiental del sector:

- Uso de cementos con menor contenido de clínker.
- Incorporación de materiales reciclados.
- Aplicación de estrategias de economía circular.
- Optimización logística del transporte.
- Certificaciones ambientales para proyectos VIS.
- Aprovechamiento de residuos de construcción y demolición.

---

**Propuesta de solución**

Se propone la implementación de un modelo de construcción sostenible para proyectos de Vivienda de Interés Social en Bogotá basado en cuatro componentes principales:

**Componente 1. Sustitución progresiva del cemento convencional**

Promover el uso de cementos con adiciones minerales y cementos de bajo carbono que reduzcan las emisiones asociadas a la fabricación del clínker.

**Componente 2. Economía circular**

Incorporar residuos de construcción y demolición como materiales aprovechables dentro de nuevos procesos constructivos.

**Componente 3. Gestión eficiente de recursos**

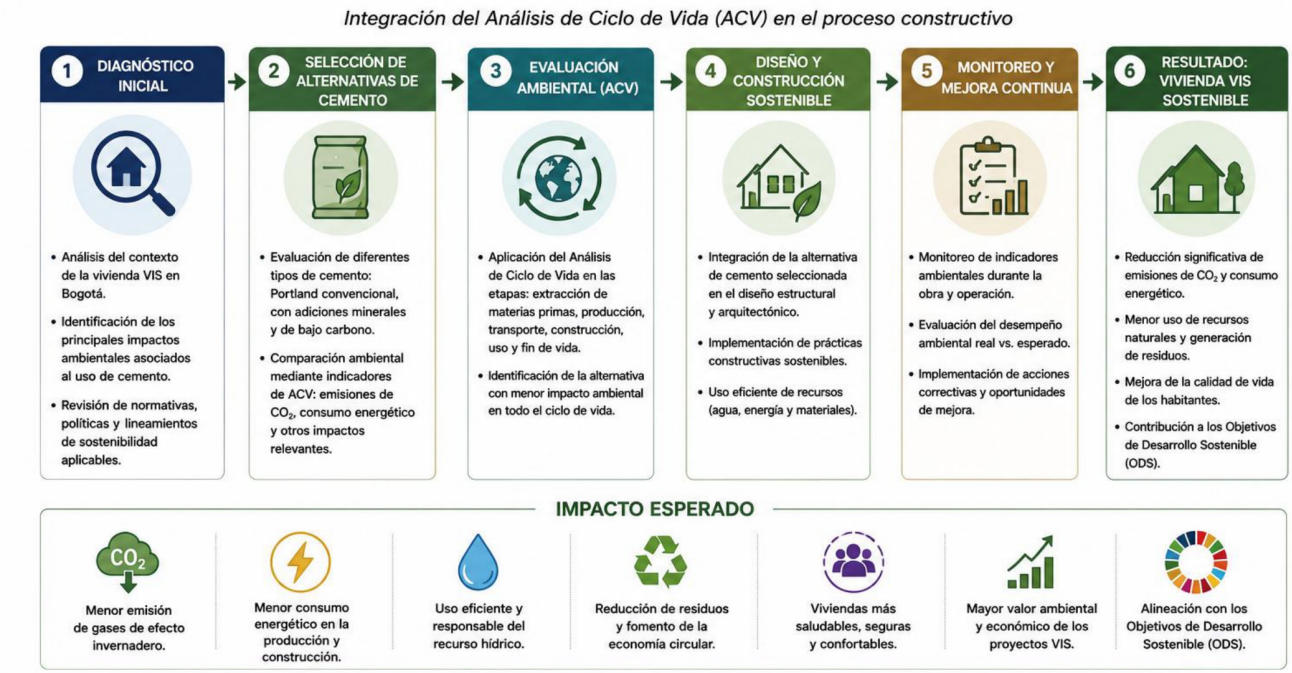
Implementar prácticas orientadas al ahorro energético y uso eficiente del agua durante las etapas constructivas.

**Componente 4. Certificación ambiental**

Promover la aplicación de estándares como LEED y EDGE para garantizar mejores niveles de sostenibilidad en proyectos de vivienda.

La implementación conjunta de estas estrategias permitiría reducir significativamente los impactos ambientales asociados al uso de cemento en Viviendas de Interés Social, contribuyendo al desarrollo sostenible de Bogotá y al cumplimiento de los compromisos nacionales e internacionales relacionados con la mitigación del cambio climático.

**Figura 6. Modelos de implementacion sostenible para viviendas de interes social en bogota.**




**Nota.** Elaboración propia con base en los principios de construcción sostenible, análisis de ciclo de vida y certificaciones ambientales reportados por United Nations Environment Programme (2022), International Finance Corporation (2022), U.S. Green Building Council (2023), Li et al. (2022) y Ding et al. (2021).

La Figura 6 sintetiza la propuesta formulada para proyectos de Vivienda de Interés Social en Bogotá. El modelo integra la sustitución progresiva del cemento convencional, la incorporación de principios de economía circular, la gestión eficiente de recursos y la aplicación de certificaciones ambientales, con el objetivo de disminuir las emisiones de carbono, reducir el consumo energético y promover una construcción más sostenible.

## Discusión

### Limitaciones del estudio:

La presente investigación tuvo como propósito evaluar los impactos ambientales asociados al uso de cemento en la construcción de Viviendas de Interés Social (VIS) en Bogotá, mediante un análisis de las diferentes etapas de su ciclo de vida, la identificación de los principales impactos ambientales generados, la comparación de alternativas de cemento y la formulación de estrategias orientadas a la sostenibilidad del sector constructor. Los resultados obtenidos permiten comprender la relevancia ambiental de este material dentro de la industria de la construcción y aportan elementos técnicos para la toma de decisiones orientadas hacia modelos constructivos más sostenibles.

En relación con el primer objetivo específico, se identificó que la etapa de producción del cemento, especialmente la fabricación del clínker, constituye la fase con mayor impacto ambiental dentro de su ciclo de vida. Este hallazgo coincide con lo reportado por Cabeza et al. (2021), quienes señalan que la producción de clínker representa la principal fuente de emisiones de dióxido de carbono dentro de la industria cementera. Asimismo, Chau et al. (2021) destacan que los procesos de extracción de materias primas y producción industrial concentran la mayor parte de los consumos energéticos y emisiones atmosféricas asociadas al cemento.

Los resultados obtenidos también evidencian que el análisis del ciclo de vida constituye una herramienta adecuada para evaluar el desempeño ambiental de materiales de construcción. La aplicación de esta metodología permitió identificar de manera integral los impactos generados desde la extracción de materias primas hasta la disposición final de los residuos, proporcionando una visión más completa que los análisis centrados únicamente en las etapas de construcción. Este aspecto coincide con lo planteado por la norma ISO 14040 (International Organization for Standardization, 2006), la cual establece que las evaluaciones ambientales deben considerar todas las etapas que conforman el ciclo de vida de un producto para evitar transferencias de impactos entre fases.

Respecto al segundo objetivo específico, los resultados permitieron determinar que las emisiones de dióxido de carbono y el consumo energético son los impactos ambientales más relevantes asociados al uso de cemento en proyectos de Vivienda de Interés Social. Esta situación se explica por la necesidad de utilizar altas temperaturas durante la producción del clínker y por la liberación de $CO_2$ derivada de la descomposición química de la piedra caliza.

Estos resultados son consistentes con los reportes del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP, 2022), que identifican al sector de la construcción como responsable de aproximadamente el 37 % de las emisiones globales relacionadas con la energía. De igual manera, Acuto et al. (2020) señalan que el crecimiento urbano acelerado incrementa la demanda de materiales de construcción y, en consecuencia, aumenta la presión ambiental asociada a su producción.

Otro hallazgo relevante corresponde al consumo de recursos naturales y agua durante los procesos industriales relacionados con la fabricación del cemento. Aunque estos impactos presentan una menor magnitud comparados con las emisiones de carbono, continúan representando desafíos importantes para la sostenibilidad del sector. En particular, la extracción de piedra caliza y otros minerales puede generar alteraciones significativas en los ecosistemas y paisajes donde se desarrollan actividades mineras.

En cuanto al tercer objetivo específico, la comparación entre diferentes tipos de cemento evidenció que los cementos de bajo carbono presentan un desempeño ambiental superior frente al cemento Portland convencional. Los resultados obtenidos muestran que la reducción del contenido de clínker y la incorporación de materiales suplementarios

permiten disminuir significativamente las emisiones de carbono asociadas a la producción del cemento.

Este resultado coincide con las conclusiones de Zhang et al. (2020), quienes afirman que los materiales de construcción con menor intensidad de carbono constituyen una de las principales estrategias para reducir los impactos ambientales de las edificaciones. De igual manera, Li et al. (2022) demostraron que la selección adecuada de materiales durante las etapas tempranas del diseño puede reducir considerablemente la huella ambiental de los proyectos constructivos.

Sin embargo, aunque los cementos de bajo carbono ofrecen ventajas ambientales importantes, su implementación aún enfrenta diversos desafíos. Entre ellos se encuentran los costos iniciales de adopción, la disponibilidad limitada en algunos mercados y la necesidad de fortalecer el conocimiento técnico sobre sus propiedades y aplicaciones. Esta situación evidencia que la transición hacia materiales más sostenibles requiere no solo innovaciones tecnológicas, sino también mecanismos de apoyo institucional y normativo que faciliten su incorporación dentro del sector constructor colombiano.

Respecto al cuarto objetivo específico, la investigación permitió formular una serie de estrategias orientadas a reducir los impactos ambientales derivados del uso de cemento en proyectos VIS. Entre las principales propuestas destacan la utilización de cementos con adiciones minerales, la implementación de principios de economía circular, el aprovechamiento de residuos de construcción y demolición, la optimización logística del transporte de materiales y la adopción de certificaciones ambientales.

Estas estrategias presentan una alta coherencia con las tendencias internacionales de construcción sostenible promovidas por organismos como la International Finance Corporation (2022) mediante la certificación EDGE y la U.S. Green Building Council (2023) mediante la certificación LEED. Ambas iniciativas destacan la importancia de reducir el consumo de recursos y las emisiones de carbono durante el ciclo de vida de las edificaciones.

Uno de los aspectos más importantes identificados durante el estudio es que la sostenibilidad de la construcción no depende exclusivamente de la selección de materiales, sino también de las decisiones adoptadas durante las etapas de diseño, planificación y gestión de los proyectos. En este sentido, García-Hansen et al. (2021) señalan que las decisiones tomadas durante las fases tempranas de diseño pueden determinar gran parte del desempeño energético y ambiental de una edificación durante toda su vida útil.

Desde la perspectiva de la hipótesis planteada, los resultados obtenidos permiten aceptar la hipótesis principal de la investigación, la cual establecía que la implementación de estrategias de construcción sostenible y el uso de cementos de menor impacto ambiental pueden contribuir significativamente a la reducción de los impactos ambientales asociados a proyectos de Vivienda de Interés Social en Bogotá. La evidencia recopilada demuestra

que existen alternativas técnicas viables capaces de disminuir emisiones, optimizar el uso de recursos y mejorar el desempeño ambiental general de las edificaciones.

No obstante, la investigación presenta algunas limitaciones que deben ser consideradas. En primer lugar, el estudio se desarrolló mediante una metodología documental basada en fuentes secundarias, por lo que no se realizaron mediciones directas en proyectos reales de Vivienda de Interés Social. En segundo lugar, la disponibilidad de información específica sobre el desempeño ambiental de diferentes tipos de cemento en Bogotá es limitada, lo que dificulta la realización de análisis comparativos más precisos. Finalmente, las condiciones tecnológicas y económicas de los proyectos constructivos pueden variar considerablemente entre diferentes regiones y empresas constructoras.

Estas limitaciones representan oportunidades para futuras investigaciones. Se recomienda desarrollar estudios que incluyan análisis de ciclo de vida aplicados directamente a proyectos VIS ejecutados en Bogotá, así como evaluaciones económicas que permitan determinar la viabilidad financiera de implementar cementos de bajo carbono en proyectos de vivienda social. Asimismo, sería pertinente analizar el comportamiento ambiental de otros materiales de construcción utilizados frecuentemente en el contexto colombiano.

En términos generales, los resultados obtenidos evidencian que la reducción de los impactos ambientales asociados al uso de cemento constituye una oportunidad estratégica para avanzar hacia modelos de construcción más sostenibles. La adopción de tecnologías limpias, materiales alternativos y estrategias de economía circular puede contribuir significativamente al cumplimiento de los objetivos nacionales e internacionales relacionados con la mitigación del cambio climático, el uso eficiente de recursos y el desarrollo sostenible de las ciudades.

La presente investigación aporta evidencia que respalda la necesidad de fortalecer la integración de criterios ambientales dentro de los procesos de diseño, construcción y gestión de proyectos de Vivienda de Interés Social en Bogotá, demostrando que es posible combinar objetivos sociales, económicos y ambientales mediante la implementación de prácticas constructivas más sostenibles.

Los resultados obtenidos permiten aceptar la hipótesis planteada inicialmente, debido a que la evidencia científica analizada demuestra que la utilización de cementos con menor contenido de clínker y la aplicación de estrategias de construcción sostenible reducen significativamente las emisiones de $CO_2$, el consumo energético y el uso de recursos naturales en proyectos de vivienda de interés social.

**evaluación de los impactos ambientales asociados al uso de cemento en la construcción de viviendas de interés social en Bogotá D.C**

## Plan de divulgación

La divulgación de los resultados constituye una etapa fundamental dentro de cualquier proceso investigativo, ya que permite transferir el conocimiento generado hacia diferentes actores interesados, incluyendo la comunidad académica, entidades gubernamentales, empresas constructoras y profesionales vinculados al sector de la construcción sostenible. En el caso de la presente investigación, titulada *"Evaluación de los impactos ambientales asociados al uso de cemento en la construcción de Viviendas de Interés Social en Bogotá mediante análisis de ciclo de vida y estrategias de sostenibilidad"*, se propone una estrategia de divulgación orientada principalmente a la publicación de un artículo científico y a la socialización de los resultados con organizaciones relacionadas con el desarrollo urbano sostenible.

El producto principal derivado del trabajo de grado será un **artículo científico de revisión aplicada**, elaborado a partir de los resultados obtenidos durante la investigación. Este formato fue seleccionado debido a que la naturaleza del proyecto corresponde a una investigación documental y analítica basada en la revisión de literatura científica, evaluación de impactos ambientales y formulación de estrategias sostenibles. La publicación de un artículo científico permitirá difundir los hallazgos de manera estructurada y facilitará su consulta por parte de investigadores, estudiantes y profesionales interesados en sostenibilidad ambiental, construcción sostenible y análisis de ciclo de vida.

La estructura del artículo incluirá introducción, metodología, resultados, discusión y conclusiones, siguiendo los lineamientos establecidos por revistas académicas relacionadas con ingeniería ambiental, sostenibilidad y construcción. El manuscrito será adaptado a los requisitos editoriales de revistas científicas nacionales o internacionales especializadas en gestión ambiental, construcción sostenible o evaluación ambiental de materiales.

Como primera actividad del plan de divulgación, se realizará la consolidación y revisión final de los resultados obtenidos durante la investigación. Esta etapa incluirá la verificación de citas bibliográficas, revisión de coherencia metodológica y adecuación del documento a los estándares de publicación científica. Posteriormente, se llevará a cabo la redacción definitiva del artículo, enfatizando los hallazgos más relevantes relacionados con los impactos ambientales del cemento y las oportunidades de mejora identificadas para proyectos de Vivienda de Interés Social en Bogotá.

Una segunda estrategia de divulgación consistirá en la presentación de los resultados en eventos académicos organizados por la Universidad EAN. La participación en seminarios, encuentros de investigación y jornadas académicas permitirá compartir los resultados con estudiantes, docentes e investigadores interesados en temas de sostenibilidad urbana y construcción ambientalmente responsable. Estas actividades contribuirán a fortalecer la apropiación social del conocimiento generado durante el proyecto.

Adicionalmente, se propone la elaboración de una presentación ejecutiva dirigida a empresas constructoras y entidades públicas relacionadas con vivienda y planeación urbana. El propósito de este documento será resumir los principales hallazgos del estudio y destacar las estrategias sostenibles que podrían implementarse para reducir los impactos ambientales asociados al uso de cemento en proyectos de Vivienda de Interés Social. Entre los posibles destinatarios se encuentran constructoras de vivienda VIS, consultoras ambientales, entidades distritales y organizaciones interesadas en certificaciones de construcción sostenible.

La investigación también podría servir como base para futuras iniciativas relacionadas con innovación ambiental en el sector constructor. Aunque el presente proyecto no genera una patente ni un diseño industrial susceptible de protección intelectual, sí aporta conocimiento técnico que podría apoyar el diseño de programas de sostenibilidad empresarial, lineamientos de construcción verde o propuestas de mejoramiento ambiental aplicables a proyectos de vivienda.

Para la ejecución del plan de divulgación se requerirá el acompañamiento de docentes asesores, acceso a bases de datos científicas institucionales y apoyo de los programas de investigación de la Universidad EAN. Asimismo, será importante contar con espacios académicos para la presentación de resultados y mecanismos institucionales que faciliten la difusión de productos científicos derivados del trabajo de grado.

Cronograma del plan de divulgación

| **Actividad** | **Mes 1** | **Mes 2** | **Mes 3** | **Mes 4** |
|---|---|---|---|---|
| Ajuste final del documento | X | | | |
| Elaboración artículo científico | X | X | | |
| Revisión por asesor | | X | | |
| Presentación académica | | | X | |
| Socialización externa | | | X | |
| Envío a revista | | | | X |

**Nota. Elaboración propia (2026).**

Los resultados esperados de este plan incluyen la difusión académica de los hallazgos, el fortalecimiento de la cultura investigativa, la generación de conocimiento aplicable al sector de la construcción y la promoción de estrategias orientadas a la reducción de impactos ambientales en proyectos de Vivienda de Interés Social. De esta manera, la investigación trasciende el ámbito académico y contribuye al desarrollo de prácticas más sostenibles dentro del contexto urbano de Bogotá.

## Conclusiones

La presente investigación tuvo como objetivo general evaluar los impactos ambientales asociados al uso de cemento en la construcción de Viviendas de Interés Social (VIS) en Bogotá, mediante el análisis de su ciclo de vida, la identificación de los principales impactos ambientales generados, la comparación de diferentes tipos de cemento y la formulación de estrategias sostenibles orientadas a la reducción de dichos impactos. Los resultados obtenidos permitieron comprender la importancia que tiene este material dentro del sector constructor y evidenciaron la necesidad de fortalecer la incorporación de criterios ambientales en los procesos de diseño, construcción y gestión de proyectos de vivienda.

En relación con el primer objetivo específico, se logró identificar las principales etapas que conforman el ciclo de vida del cemento utilizado en proyectos de Vivienda de Interés Social, las cuales incluyen la extracción de materias primas, producción industrial, transporte, uso en la construcción y disposición final de residuos. El análisis realizado permitió establecer que la etapa de producción del clínker representa la fase más crítica desde el punto de vista ambiental debido al elevado consumo energético y a las emisiones de dióxido de carbono generadas durante el proceso de calcinación. En consecuencia, se concluye que cualquier estrategia orientada a mejorar el desempeño ambiental del cemento debe concentrarse prioritariamente en esta etapa del ciclo de vida.

Respecto al segundo objetivo específico, los resultados permitieron determinar que las emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente dióxido de carbono ($CO_2$), constituyen el principal impacto ambiental asociado al uso de cemento en la construcción de viviendas. Asimismo, se identificó que el consumo energético, la explotación de recursos naturales, el uso de agua y la generación de residuos representan factores ambientales relevantes que afectan la sostenibilidad del sector constructor. Estos hallazgos confirman que la industria cementera mantiene una relación directa con algunos de los principales desafíos ambientales globales, incluyendo el cambio climático, el agotamiento de recursos y la generación de residuos sólidos.

En cuanto al tercer objetivo específico, la comparación realizada entre diferentes tipos de cemento evidenció que los cementos de bajo carbono y aquellos que incorporan materiales

suplementarios presentan un mejor desempeño ambiental frente al cemento Portland convencional. La reducción del contenido de clínker, el aprovechamiento de subproductos industriales y la optimización de procesos productivos permiten disminuir significativamente las emisiones de carbono y el consumo de recursos asociados a la fabricación del material. Por lo tanto, se concluye que la adopción progresiva de cementos alternativos representa una estrategia viable para reducir la huella ambiental de los proyectos de Vivienda de Interés Social desarrollados en Bogotá.

Con respecto al cuarto objetivo específico, se formularon diversas estrategias sostenibles orientadas a mitigar los impactos ambientales identificados. Entre ellas se destacan la implementación de principios de economía circular, el uso de cementos de bajo carbono, el aprovechamiento de residuos de construcción y demolición, la optimización logística del transporte de materiales y la incorporación de certificaciones ambientales como LEED y EDGE. Estas acciones pueden contribuir de manera significativa a mejorar el desempeño ambiental de los proyectos constructivos y promover prácticas más sostenibles dentro del sector de la construcción.

Los resultados obtenidos permiten aceptar la hipótesis planteada al inicio de la investigación, la cual establecía que la implementación de estrategias sostenibles y el uso de materiales con menor impacto ambiental pueden reducir significativamente los impactos ambientales asociados al uso de cemento en proyectos de Vivienda de Interés Social en Bogotá. La evidencia recopilada demuestra que existen alternativas técnicas y ambientales capaces de disminuir las emisiones de carbono, optimizar el consumo de recursos y favorecer una gestión más eficiente de los materiales utilizados durante el proceso constructivo.

No obstante, la investigación presenta algunas limitaciones que deben ser consideradas. La principal limitación corresponde a la naturaleza documental del estudio, ya que los resultados se fundamentan en información secundaria obtenida de literatura científica, informes técnicos y documentos normativos. Por esta razón, no fue posible realizar mediciones directas en proyectos reales de Vivienda de Interés Social ni desarrollar análisis experimentales específicos para Bogotá. Asimismo, existe una disponibilidad limitada de estudios locales relacionados con el desempeño ambiental comparativo de diferentes tipos de cemento en el contexto colombiano.

Finalmente, se recomienda que futuras investigaciones desarrollen análisis de ciclo de vida aplicados directamente a proyectos VIS ejecutados en Bogotá, incorporen evaluaciones económicas relacionadas con la implementación de materiales sostenibles y analicen otros componentes constructivos relevantes para la sostenibilidad del sector. De igual manera, resulta importante fortalecer la investigación sobre economía circular, reutilización de residuos y tecnologías de construcción baja en carbono, con el fin de contribuir al cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible y a la reducción de los impactos ambientales asociados al crecimiento urbano.

**evaluación de los impactos ambientales asociados al uso de cemento en la construcción de viviendas de interés social en Bogotá D.C**

En conclusión, la construcción sostenible representa una oportunidad estratégica para mejorar el desempeño ambiental del sector edificador en Bogotá. La incorporación de materiales de menor impacto, la optimización de procesos constructivos y la adopción de enfoques basados en el análisis de ciclo de vida pueden contribuir significativamente a la reducción de emisiones, al uso eficiente de recursos y al desarrollo de ciudades más sostenibles para las generaciones futuras.

## Referencias bibliográficas

Acuto, M., Parnell, S., & Seto, K. C. (2020). *Building a global urban science*. *Nature Sustainability, 3*(1), 2–4. https://doi.org/10.1038/s41893-019-0464-9

Ascione, F., Bianco, N., De Masi, R. F., Mauro, G. M., & Vanoli, G. P. (2022). *Early stage building energy performance simulation: A review of methods and applications*. *Building and Environment, 207*, 108474. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108474

Cabeza, L. F., Rincón, L., Vilariño, V., Pérez, G., & Castell, A. (2021). *Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 29*, 394–416. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.037

Chau, C. K., Leung, T. M., & Ng, W. Y. (2021). *A review on life cycle assessment, life cycle energy assessment and life cycle carbon emissions assessment on buildings*. *Applied Energy, 143*, 395–413. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.023

Ding, G. K. C., Fan, L., & Tam, V. W. Y. (2021). *Development of a decision support framework for improving sustainability performance in early building design stage*. *Journal of Cleaner Production, 281*, 124952. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124952

García-Hansen, V., Isoardi, G., & Miller, W. (2021). *The influence of early design decisions on building energy consumption*. *Building and Environment, 187*, 107395. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107395

International Finance Corporation. (2022). *EDGE green building certification: Technical guide*. World Bank Group. https://edgebuildings.com

International Organization for Standardization. (2006). *ISO 14040: Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework*. ISO.

Li, X., Wen, J., & Zhou, Y. (2022). *Optimization of early-stage building design for energy performance using simulation-based methods*. *Applied Energy, 306*, 118083. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118083

López-Ruiz, L. A., Rojas-Solórzano, L., & Vásquez, F. (2020). *Urban water reuse systems and their environmental performance in Latin America*. *Sustainable Cities and Society, 60*, 102281. https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102281

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2015). *Resolución 0549 de 2015: Por la cual se establecen lineamientos de construcción sostenible en Colombia*. Gobierno de Colombia. https://www.minvivienda.gov.co

Pomponi, F., & Moncaster, A. (2017). *Circular economy for the built environment: A research framework*. *Journal of Cleaner Production, 143*, 710–718. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.055

United Nations Environment Programme. (2022). *2022 global status report for buildings and construction*. UNEP. https://www.unep.org

U.S. Green Building Council. (2023). *LEED v4 for building design and construction*. https://www.usgbc.org

World Commission on Environment and Development. (1987). *Our common future*. Oxford University Press.

Zhang, Y., Tian, W., & Deng, N. (2020). *Simulation-based optimization for sustainable building design: A review*. *Energy and Buildings, 226*, 110367. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110367