

OPTIMIZACIONES EN EL DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO PARA LA SOSTENIBILIDAD DE UN ÁREA METROPOLITANA DE SUDAMÉRICA IMPLEMENTANDO ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE MATERIALES

OPTIMIZATION IN THE DESIGN OF CONCRETE MIXES FOR THE SUSTAINABILITY OF A SOUTH AMERICAN METROPOLITAN AREA BY IMPLEMENTING MATERIAL LIFE CYCLE ANALYSIS

OTIMIZAÇÕES NO PLANEJAMENTO DE MISTURAS DE CONCRETO PARA A SUSTENTABILIDADE DE UMA ÁREA METROPOLITANA NA AMÉRICA DO SUL, IMPLEMENTANDO A ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DOS MATERIAIS

Andrés Felipe Restrepo-Ramírez

Magíster en Construcción
 Profesor auxiliar, Escuela de Construcción, Facultad de Arquitectura
 Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia
<https://orcid.org/0000-0002-1178-7780>
anfrestepora@unal.edu.co (Autor de Correspondencia)

Carlos Andrés Rúa-Machado

Master Business Administration
 Profesor Asistente, Escuela de Construcción, Facultad de Arquitectura
 Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia
<https://orcid.org/0000-0003-4174-5087>
caruama@unal.edu.co

Yhan Paul Arias-Jaramillo

Magíster en Ingeniería de Materiales y Procesos
 Profesor Asociado, Escuela de Construcción, Facultad de Arquitectura
 Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia
<https://orcid.org/0000-0002-8988-6295>
ypariasj@unal.edu.co



RESUMEN

El análisis de Ciclo de Vida ACV, es una metodología que identifica los aspectos ambientales y los impactos potenciales asociados con un producto mediante la compilación de un inventario de las entradas y salidas del sistema para su optimización, planificación estratégica e implementación de políticas sostenibles. En el ámbito de la producción de concretos, se han utilizado diversas técnicas de optimización y su impacto en el diseño de mezclas como análisis multicriterio, modelos estadísticos, materiales cementantes suplementarios y algoritmos de optimización. Este trabajo aplica el ACV a la producción de concreto el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Colombia, con la hipótesis de optimizar las proporciones, sin agregar aditivos ni adiciones especiales, se puede reducir las emisiones de CO₂ y el consumo de energía. Utilizando la metodología ACI 211, se diseñaron mezclas de concreto y se evaluaron sus impactos ambientales. Los resultados muestran que el uso de agregados gruesos de mayor tamaño reduce el consumo de cemento, disminuyendo las emisiones de CO₂ hasta un 15%. La mezcla óptima no sólo es más económica, sino también de menor impacto ambiental. Las conclusiones indican que es posible compatibilizar la eficiencia económica, promoviendo la disminución en la huella de carbono.

Palabras clave

análisis de ciclo de vida ACV, sostenibilidad, optimización de agregados, producción de concreto

ABSTRACT

Life Cycle Assessment (LCA) is a methodology that identifies a product's environmental aspects and potential impacts by compiling an inventory of system inputs and outputs for optimization, strategic planning, and implementing sustainable policies. Several optimization techniques and their impact on mix design have been used in concrete production, such as multi-criteria analysis, statistical models, supplementary cementitious materials, and optimization algorithms. This work applies LCA to concrete production in the Metropolitan Area of the Aburrá Valley, Colombia, with the hypothesis that optimizing proportions without adding special additives can reduce CO₂ emissions and energy consumption. Concrete mixes were designed using the ACI 211 methodology, and their environmental impacts were evaluated. The results show that using larger coarse aggregates reduces cement consumption, decreasing CO₂ emissions by up to 15%. The optimal mix is not only cheaper but also has a lower environmental impact. The conclusions indicate that it is possible to make economic efficiency compatible with promoting a lower carbon footprint.

Keywords

life cycle assessment LCA, sustainability, aggregate optimization, concrete production

RESUMO

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia que identifica os aspectos ambientais e os possíveis impactos associados a um produto por meio da compilação de um levantamento das entradas e saídas do sistema para otimização, planejamento estratégico e implementação de políticas sustentáveis. No campo da produção de concreto, várias técnicas de otimização têm sido usadas e seu impacto no projeto de mistura, como análise multicritério, modelagem estatística, materiais cimentícios suplementares e algoritmos de otimização. Este trabalho aplica a ACV à produção de concreto na Área Metropolitana do Vale de Aburrá, na Colômbia, com a hipótese de que a otimização das proporções, sem a adição de aditivos ou aditivos especiais, pode reduzir as emissões de CO₂ e o consumo de energia. Usando a metodologia ACI 211, as misturas de concreto foram projetadas e seus impactos ambientais foram avaliados. Os resultados mostram que o uso de agregados grossos maiores reduz o consumo de cimento, reduzindo as emissões de CO₂ em até 15%. A mistura ideal não é apenas mais econômica, mas também tem um impacto ambiental menor. As conclusões indicam que é possível compatibilizar a eficiência econômica e, ao mesmo tempo, promover uma redução na pegada de carbono.

Palavras-chave:

análise do ciclo de vida ACV, sustentabilidade, otimização de agregados, produção de concreto

INTRODUCCIÓN

La producción de concreto es parte fundamental del sector industrial de la construcción, pero su impacto ambiental ha sido objeto de creciente preocupación en un mundo en busca de prácticas sostenibles debido a la sobreexplotación de recursos y el daño de múltiples ecosistemas. Diversas investigaciones han demostrado que el concreto es uno de los principales generadores de GEI (Belaïd, 2022; Das et al., 2023; Mocová et al., 2019; Watari et al., 2023). La demanda mundial de este material se ha cuadruplicado en las últimas tres décadas, lo que ha provocado un aumento de las emisiones de CO₂ exacerbando la escasez de arena y el conflicto social (Watari et al., 2023). En este contexto, ACV se convierte en una herramienta esencial para evaluar y desarrollar criterios que ayudan a mitigar los impactos ambientales negativos que genera la producción de mezclas de concreto. Aunque existen desafíos y discrepancias en la medición del impacto ambiental del concreto por la ausencia de una metodología estandarizada de ACV, los estudios proporcionan criterios para avanzar en este marco (Jayasuriya et al., 2023). Estas discrepancias surgen de factores como la definición del alcance, los datos del inventario, la evaluación del impacto y la interpretación (Hafez et al., 2019), sin embargo, existen algunos estándares como la norma NTC-ISO 14044 (ICONTEC, 2021) que se implementa en algunos países de Latinoamérica, especialmente en Colombia, la que establece un enfoque sistemático y holístico para evaluar

los impactos ambientales de procesos y productos de forma estructurada.

La ISO 14044, define este proceso como la recopilación y evaluación de las entradas, las salidas y los impactos potenciales de un sistema de producción de un producto, a través de su ciclo de vida lo que convierte el ACV. de forma complementaria vincular otros enfoques, por ejemplo, Lean Construction (Koskela et al., 2019), abren las posibilidades de comprensión y articulación. La tabla 1, sintetiza algunos aportes orientados a la búsqueda de implementaciones basadas en ISO 14044.

Estas herramientas, a través de sus modelos metodológicos y numéricos aportan elementos clave para los desafíos ambientales que enfrenta la humanidad (Boccia y Sarnacchiaro, 2018; Crowther y Seifi, 2022), además, sirven como base para revertir los hallazgos del Foro Económico Mundial sobre el comportamiento de muchas empresas y organizaciones que, a menudo subestiman o pasan por alto los riesgos ambientales asociados a su cadena de valor y la falta de incorporación de criterios sostenibles en sus proyectos y actividades comerciales (WEF, 2020).

En este sentido se hace necesario, a través de lineamientos de ISO 14044, medir los impactos por emisiones de CO₂, desde los procesos tradicionales del diseño de mezclas de concreto en obra que permitan identificar estrategias que contribuyan a los retos de mitigación

Tabla 1. Modelos de análisis ACV basados en NTC-ISO 14044. Fuente: Elaboración de los autores.

Región	Herramienta	Descripción
EEUU	TRACI (Tool for Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts) (Henderson, Niblick y Golden, 2021)	Evaluar los impactos ambientales. Proporciona una base de datos de impactos ambientales que se puede utilizar en análisis de ciclo de vida.
	BEES (Building for Environmental and Economic Sustainability) (Kneifel et al., 2019)	Permite a actores AECO seleccionar productos de construcción rentables y ambientalmente basados en estándares de consenso.
España	UNE-EN 15804:2012+A1:2014	Proporciona un marco para la declaración ambiental de productos y evalúa su ACV centrada en edificaciones.
Unión Europea	PEF (Product Environmental Footprint) (European Commission, 2021)	Evalúan el impacto ambiental multicriterio de productos y organizaciones. Siguen los principios de la ISO 14040 y 14044.
	OEF (Organizational Environmental Footprint) (Damiani et al., 2022)	
	EW-MFA (Material flow account) (Europäische Kommission Statistisches Amt, 2018)	
Global	SimaPro (Speck et al., 2016)	Software de análisis ACV. Sigue los principios de la ISO.
	EIO-LCA (Azari, 2019)	Evalúa las interconexiones económicas y ambientales en una escala nacional o regional.
	SFA (Substance Flow Analysis) (Chertow, 2004)	Evalúa los flujos de sustancias en una zona determinada durante un tiempo determinado (generalmente un año).

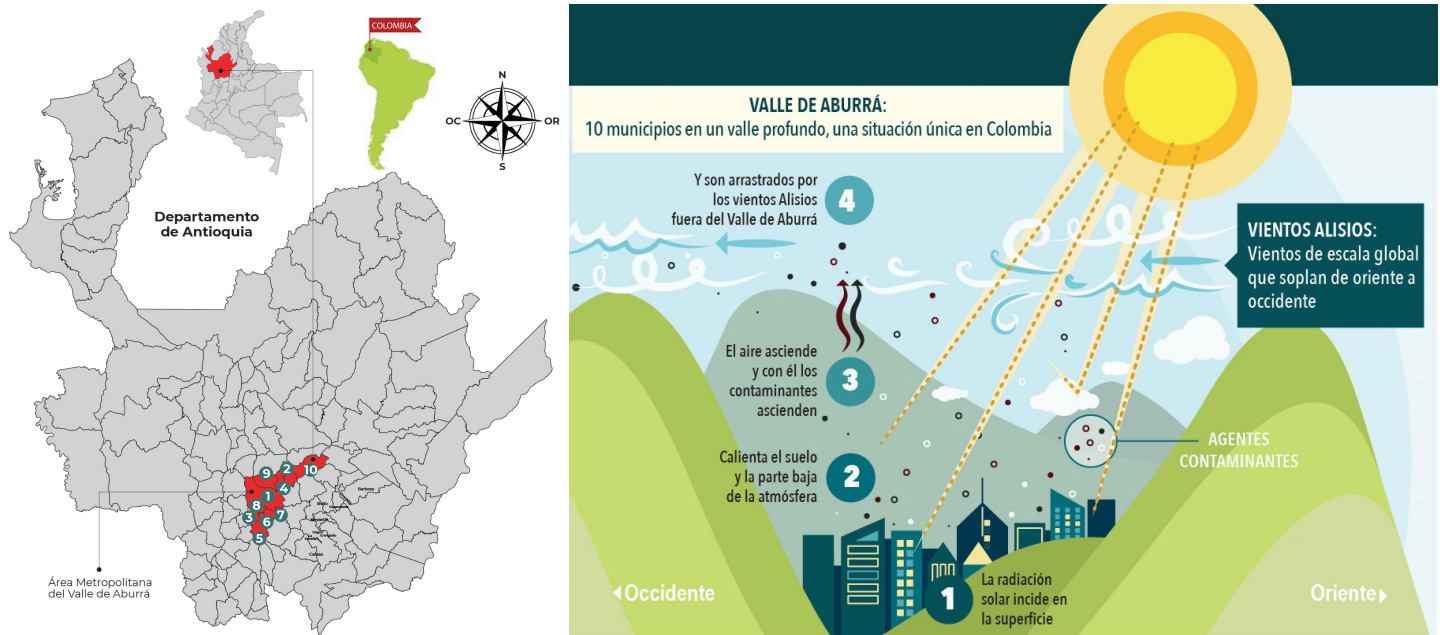


Figura 1. Escenario Valle de Aburrá. Fuente: Mapa (Asoareas, 2021), Imagen (SIATA, 2016).

de GEI en la región, de manera que pueda ir en sintonía con las políticas públicas de cambio climático, en el caso particular se ha seleccionado la ciudad de Medellín – Colombia, teniendo como referente el Plan de Acción Climática PAC 2020 -2050, (Alcaldía de Medellín, 2020), núcleo metropolitano del Valle de Aburrá.

La fase actual del proyecto de investigación reúne un levantamiento de datos asociados a las propiedades de los áridos de diferentes canteras distribuidas en el área metropolitana del Valle de Aburrá en el departamento de Antioquia, Colombia. Debido a las características topográficas y climatológicas, este territorio, se define como una cuenca atmosférica (AMVA, 2015), ya que su espacio está delimitado por montañas y en él se propicia la concentración y reacción de gases y partículas contaminantes del aire que no son desplazadas completamente por los vientos (Figura 1).

El perímetro montañoso condiciona los movimientos de distribución que genera el sistema de vientos alisios y por ello el fenómeno se agrava en algunas temporadas del año. (Agusti-Panareda et al., 2019; B. Liu et al., 2023; SIATA, 2016). Un estudio local (AMVA, 2017), señala que este tipo de condiciones generan un efecto de concentración que se caracteriza por un límite atmosférico de baja altura y alta nubosidad, limitando la penetración de radiación solar y provocando enfriamiento del aire. Esto sumado a los vientos débiles, limita la dispersión de material particulado y otros contaminantes. Esta situación que se agudiza con una creciente densidad poblacional de 3557 habitantes/km², que demanda la construcción edificaciones típicas, con promedio de 30 niveles, que emplean sistemas estructurales basados en muros en concreto reforzado, dando como resultado un

aumento acelerado en la producción de concreto y por consiguiente, en la explotación de las materias primas que lo componen.

En este escenario, se generan episodios de contaminación que son acentuados en gran medida por la carga que genera el parque automotor, El PAC 2020-2050 indica que: “la proporción de aporte a la contaminación por fuentes industriales es cercana al 30 %, mientras las fuentes móviles generan cerca del 69 % de las emisiones atmosféricas evaluadas y, en particular, son responsables del 91 % de las emisiones de PM 2,5” (Alcaldía de Medellín, 2021). La incidencia del parque automotor constituye una de las variables fundamentales de GEI para la región y particularmente para las actividades de producción de concreto, ya que el uso intensivo de áridos (arena/grava) y su transporte, desde las canteras, implica una circulación constante de vehículos de carga necesarios para la producción in situ del mismo.

El reconocimiento y reflexión sobre esta situación en el entorno debe favorecer, en cualquier actividad económica vinculada a la cadena de valor de la construcción, al desarrollo de una conciencia sostenible y uno de los beneficios clave de ello reside en los procesos de formación, donde la sensibilización permite a los educandos desarrollar un pensamiento sistémico que los conduzca a evaluar el impacto de su toma de decisiones y la habilidad para la gestión del carbono (CLC , 2016) a través de las adquisiciones de los recursos en todo su ciclo de vida (Bohvalovs et al., 2023; Martinsone et al., 2023). Esto, para el sector económico de la construcción, puede representar un progreso hacia el desarrollo sostenible de las edificaciones y la divulgación de información relevante relacionada con la sostenibilidad.

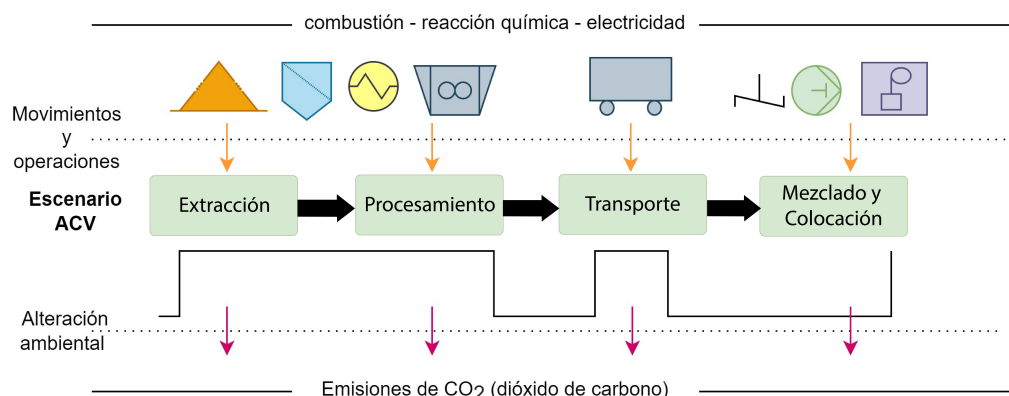


Figura 2. Contexto holístico del ciclo de emisiones del concreto. Fuente: Elaboración de los autores.

RELACIÓN CONCRETO Y MEDIO AMBIENTE

El concreto es el material artificial más utilizado en el mundo, con más de 25 Gt/año (De Andrade Salgado y De Andrade Silva, 2022; Gursel et al., 2014), está compuesto por cuatro ingredientes básicos: agua, cemento, grava como agregado grueso AG y arena como agregado fino AF. Estas materias primas constituyen uno de los recursos minerales más extraídos del planeta (Del Rey Castillo et al., 2020), además, este producto incluye etapas en su proceso de manufactura con alto consumo de energía y operaciones, convirtiéndose en el responsable de gran parte de la emisión de gases de efecto invernadero. La industria global del cemento presenta una producción de 4,1 billones de toneladas al año, lo que representa del 8-10% de las emisiones antropogénicas de CO₂ en el mundo (Poudyal y Adhikari, 2021; Vázquez-Calle et al., 2022). Además, los estudios indican que por cada kilogramo de cemento producido se liberan (0,80-0,90) kilogramos de dióxido de carbono al ambiente, convirtiendo a la producción de cemento en la principal líder de GEI después de las plantas de producción eléctrica (Ajayi y Babafemi, 2024). Según Duque (2020), un concreto típico con resistencia de 25 MPa genera 0,29 t CO₂ -eq/m³, en donde la producción del cemento representa 82% de esta cifra.

El significativo aumento en la tasa de uso de concreto en las últimas décadas como resultado del aumento de la población mundial y la correspondiente demanda de infraestructura, ha causado un gran problema para el medio ambiente (Youssf et al., 2024). La Figura 2, presenta una visión integral en la que se relacionan las etapas del ciclo de vida de la materia prima, desde su extracción hasta su procesamiento y colocación en obra. Debido a las restricciones de acceso, en este escenario el proyecto de investigación involucra sólo la caracterización de agregados gruesos y finos desde diferentes fuentes para generar un inventario de esta línea en particular. Los detalles de este proceso se describen en la metodología desarrollada.

En Colombia, estos recursos tienen una alta demanda y la tendencia del consumo es creciente. Los volúmenes de producción de concreto en el país alcanzaron una producción de 6,9 millones de m³ de junio 2022 a junio de 2023; un crecimiento del 3,7% en relación al mes de junio del año 2022. El 68,0% de la producción estuvo orientada a vivienda, 23,3% a obras civiles y 18,6% a edificaciones. Para este mismo periodo, el departamento de Antioquia región comprendida por 123 municipios, en el que se encuentra Medellín y su Área Metropolitana presenta el mayor crecimiento con un incremento del 17,6%, despacho de 179855 toneladas de cemento y una producción total de concreto de 89376 m³ (DANE, 2023).

Estas estadísticas subrayan la importancia que constituye el ACV en la elaboración de concretos, así como el monitoreo de la producción y transporte de los insumos como una vía para desarrollar datos y elaborar proyecciones de GEI asociados a estos volúmenes y cómo, desde etapas tempranas, interpretar los impactos para la definición de estrategias de mitigación.

En Colombia, actualmente el diseño de mezclas de concreto no contempla herramientas o prácticas que incluyan la cuantificación del impacto ambiental asociado a la generación de CO₂ y su repercusión en el cambio climático, pues se cuenta con metodologías desarticuladas para este fin. A partir de soluciones informáticas o herramientas como la Gestión del Ciclo de Vida del Producto o PLM (Product Life Management), pueden favorecerse los criterios de selección de cadenas de suministro más inteligentes y por ende, contribuir con medios tecnológicos al contexto de la industria 4.0 y por consiguiente, a la implementación explícita de políticas públicas (Stegmann, 2020). Estas políticas, orientadas al desarrollo sostenible del país, deberían enfocarse en incentivar la eficiencia energética y promover prácticas de construcción sostenible. De esta manera, se alineó con el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), haciendo hincapié en la creación de ciudades y comunidades sostenibles, así como en modalidades de consumo y producción que tengan como meta la reducción del 20 % de gases de efecto invernadero (GEI).

Tabla 2. Enfoques relacionados a la mitigación GEI e impactos ambientales. Fuente: Elaboración de los autores.

Enfoque	Marco	Técnica	Fuente
Optimización De concretos	Técnicas de optimización	Modelos predictivos AI - ML	(Zandifaez et al., 2023)
		Optimización multiobjetivo	(Z. Liu et al., 2023)
		Asignación de inventario	
ACV	Life Cycle Assessment Environmental Impact Assessment	Selección de agregados	(Siamardi et al., 2023)
		Agregados artificiales	(Jamil et al., 2023)
		Calcáneos	(Ghadir et al., 2021)
		Análisis petrográfico	(Goyal et al., 2023)
		Contracción/reducción Materiales reciclados	(Bush et al., 2022)
		Estudios comparativos Estrategias de descarbonización	

Tabla 3. Estudios sobre técnicas de optimización para mitigar CO2 y GEI. Fuente: Elaboración de los autores.

Fuente	Estudio	Técnicas de Optimización	Parámetros de Sostenibilidad
Naseri et al., 2023 Norte América-Oceanía	A novel evolutionary learning to prepare sustainable concrete mixtures with supplementary cementitious materials	Algoritmos de aprendizaje evolutivo, programación de optimización	Reducción del potencial de calentamiento global, consumo de energía, consumo de materiales, CO ₂ incorporado
Wang et al., 2022 Asia	Energy Optimization Design of Limestone Hybrid Concrete in Consideration of Stress Levels and Carbonation Resistance	Algoritmo genético, algoritmo del ciclo del agua	Resistencia mecánica, resistencia a la carbonatación, impacto ambiental, energía incorporada
Naseri et al., 2020 Asia-Norte América	Designing sustainable concrete mixture by developing a new machine learning technique	Algoritmos de aprendizaje automático, modelado estadístico	Reducción de CO ₂ incorporado, consumo de energía, consumo de materiales
Khan, Do y Kim, 2016 Asia	Cost effective optimal mix proportioning of high strength self-compacting concrete using response surface methodology	Metodología de superficie de respuesta (RSM)	Costos, impacto ambiental, resistencia a la compresión, durabilidad
Ibe et al., 2022 África	Optimization and Simulation of Saw Dust Ash Concrete Using Extreme Vertex Design Method	Diseño de vértice extremo	Reducción de CO ₂ incorporado, durabilidad, propiedades mecánicas
Ewa et al., 2023 África	Optimization of saw dust ash and quarry dust pervious concrete's compressive strength using Scheffe's simplex lattice method	Método de red simplex de Scheffe	Resistencia a la compresión, impacto ambiental, sostenibilidad de los materiales
Kim et al., 2022 Norteamérica	OpenConcrete: a tool for estimating the environmental impacts from concrete production	Análisis de escenarios de impactos para producir una mezcla de concreto representativa en los Estados Unidos	Emisiones de GEI, óxido de nitrógeno, óxido de azufre y compuestos orgánicos volátiles, energía embebida, consumo de agua y emisiones de partículas menores a 2,5 micrones (PM2,5).
Berkeley, s.f.	Green Concrete LCA Web Tool	Cuantificación de los impactos ambientales de la producción de concreto y sus componentes (como cemento, agregados, aditivos y materiales cementosos suplementarios).	Emisiones de GEI, energía embebida.

Los estudios más recientes abordan marcos combinados y exploran propiedades de materiales tradicionales y nuevas incorporaciones buscando eficiencias y optimizaciones que contribuyen a menores tasas de consumo de material cementante (cemento Portland) y con ello una menor huella de carbono (Tabla 2).

Desde el punto de vista de la protección ambiental, estas investigaciones están asociadas al diseño sostenible y contribuyen a la mitigación de impactos. Este trabajo se enmarca en la misma línea de la optimización y dosificación eficiente del concreto para promover mejores prácticas y criterios de valor que aminoren los efectos que genera

la actividad humana en torno a la construcción como lo propone (Oladazimi et al., 2020). Aunque los esfuerzos aún no están integrados y los desafíos ambientales de la producción de cemento y concreto persisten (Belaid, 2022) los procesos de investigación y los modelos análisis fundamentados en ISO 14044 continúan la contribución al conocimiento para aproximarse a criterios estandarizados para la toma de decisiones anticipada. La tabla 3 registra estudios específicos orientados a la optimización y mitigación de GEI. Además, se ha observado que las herramientas informáticas desarrolladas permiten cuantificar los impactos ambientales asociados a mezclas de concreto. Sin embargo, estas herramientas presentan limitaciones al no integrar fases como el diseño de las mezclas en función de las propiedades de los materiales propios del lugar y la utilización de contenidos de cemento establecidos.

Además, estos estudios suelen enfocarse únicamente en la cuantificación de gases de efecto invernadero y energía embebida. Sin embargo, no se evidencia de manera clara el efecto que pueden tener variables como el porcentaje de humedad, los tamaños de agregados y otras propiedades físicas de los materiales. Estas variables, debido a su naturaleza estocástica, pueden influir en los resultados de las herramientas desarrolladas.

Por tanto, este estudio se centra en la aplicación del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) al diseño de mezclas de concreto en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Colombia. Su propósito es demostrar que la identificación, caracterización, elección correcta y optimización de las proporciones de las mezclas de concreto pueden reducir las emisiones de CO₂, el consumo de energía y otros impactos ambientales. Lo que es especialmente relevante en un sector que presenta alta informalidad en Colombia, donde existen vacíos en los criterios objetivos para definir las fuentes de materias primas para la elaboración de mezclas de concreto. Además, la falta de una selección con criterio ambiental desde el punto de vista metodológico dificulta una respuesta ágil a la ejecución de obras de infraestructura. Con esto se busca concienciar y guiar a los tomadores de decisiones en la ejecución y diseño de los procesos constructivos, al seleccionar las materias primas utilizadas en la confección de mezclas de concreto en distintas edificaciones. Para contribuir a la solución se plantea una metodología que; a partir de la identificación de las fuentes, la caracterización de los materiales y su declaración ambiental, junto con la articulación de técnicas de diseño de mezclas de concreto, pueda generar beneficios ambientales y económicos en la producción de concreto, además de destacar la necesidad de que el sector de la construcción implemente este tipo de prácticas e iniciativas.

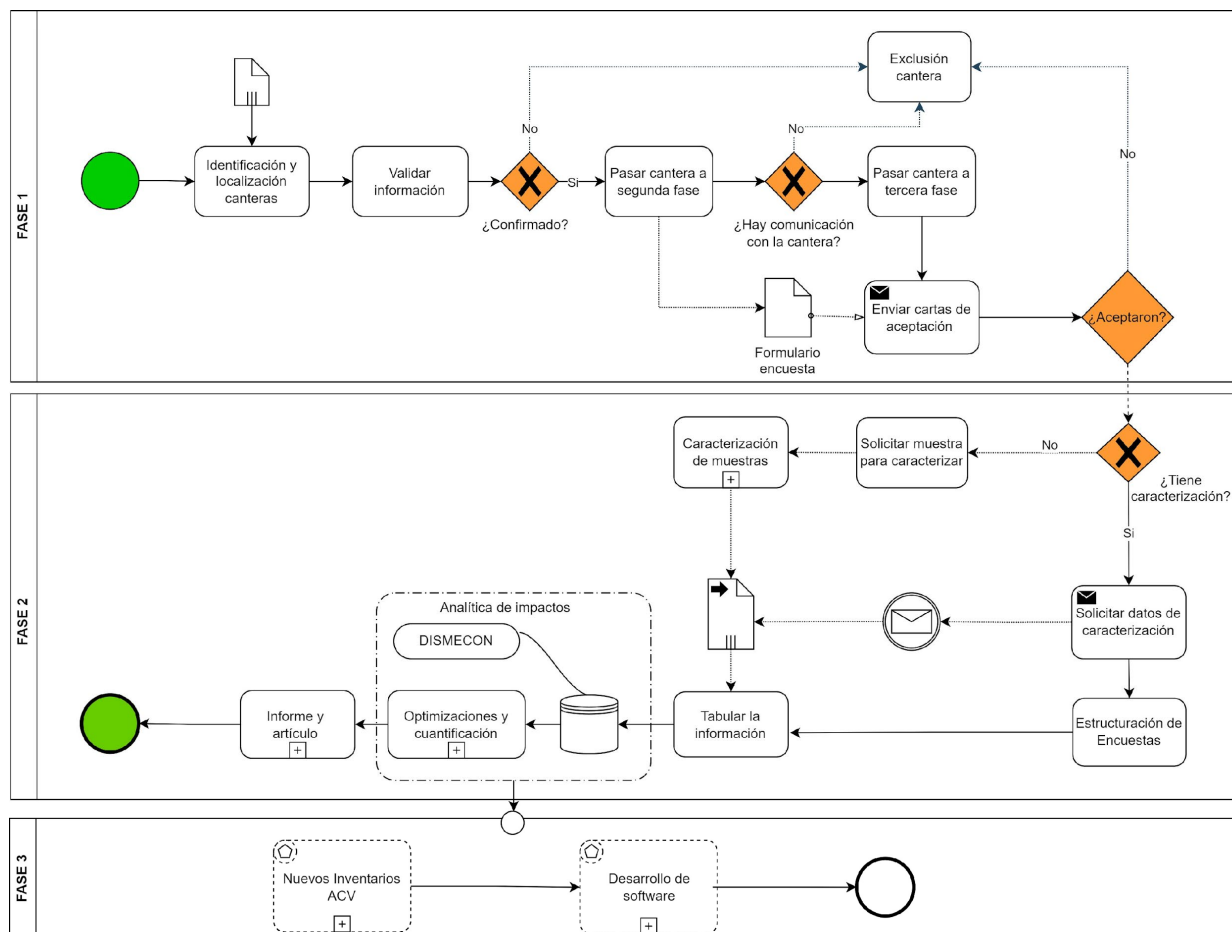


Figura 3. Fase del proceso metodológico. Fuente: Elaboración de los autores.

METODOLOGÍA

Esta investigación considera tres fases enmarcadas en el ACV. En su primera y segunda fase, se contempla el escenario de producción de concreto in situ y se enfoca en la gestión de áridos como primer inventario para la evaluación de emisiones GEI y su relación con el diseño de mezclas. Los inventarios asociados al concreto premezclado (producción en plantas industrializadas) no se abordan en este artículo, esto se propone para una futura fase 3.

Datos de la caracterización de los materiales producidos en canteras (n=13), ubicadas en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, tabla 2, son utilizados para determinar las dosificaciones de mezclas de concretos óptimas desde el punto de vista económico y ambiental. La figura 3, presenta el proceso metodológico propuesto, donde se destacan las dos primeras fases, avance de la investigación actual, y el escenario de la etapa 3 en la que se abordará el desarrollo de un software de estimación GEI para concretos in situ y premezclados.

La caracterización de los materiales de cantera, agregados finos y gruesos, se hizo bajo parámetros normativos (Normas Técnicas Colombianas NTC, y sus equivalentes a las normas ASTM) Figura 4 y Figura 5. La tabla 4 identifica la distribución de las fuentes de materia prima en los 10 municipios del Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Para un total de 13 canteras entre agregados finos y agregados gruesos.

Figura 4, Protocolos realizados para determinar los diferentes ensayos normativos y fuente de datos que componen la caracterización de los agregados gruesos AG.

Para asegurar las resistencias requeridas, los datos obtenidos mediante los ensayos de caracterización, permiten la parametrización de sus propiedades en función de la relación agua-cemento-árido. La calidad del concreto depende de varios factores, sin embargo, el diseño y la elección de materias primas como los agregados; constituyen elementos críticos en su durabilidad (Uthaman y Vishwakarma, 2023).

INVENTARIO AMBIENTAL DE LOS MATERIALES

El análisis de impacto se realizó desde el marco teórico que analiza los procesos relacionados a la producción de concreto en la zona del Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Para el inventario de la declaración ambiental de los materiales que constituyen las mezclas de concreto, se consultó la base de datos (*THE INTERNATIONAL EPD SYSTEM*, 2024); y se buscaron las empresas proveedoras de cemento portland y de agregados finos y gruesos, del lugar geográfico objeto de estudio, de las que sólo

Tabla 4. Localización fuentes de los agregados (áridos). Fuente: Elaboración de los autores.

Municipio	N° de Canteras Evaluadas
Medellín (Dtto.)	4
Girardota	3
Caldas	3
Itagüí	1
Bello	2

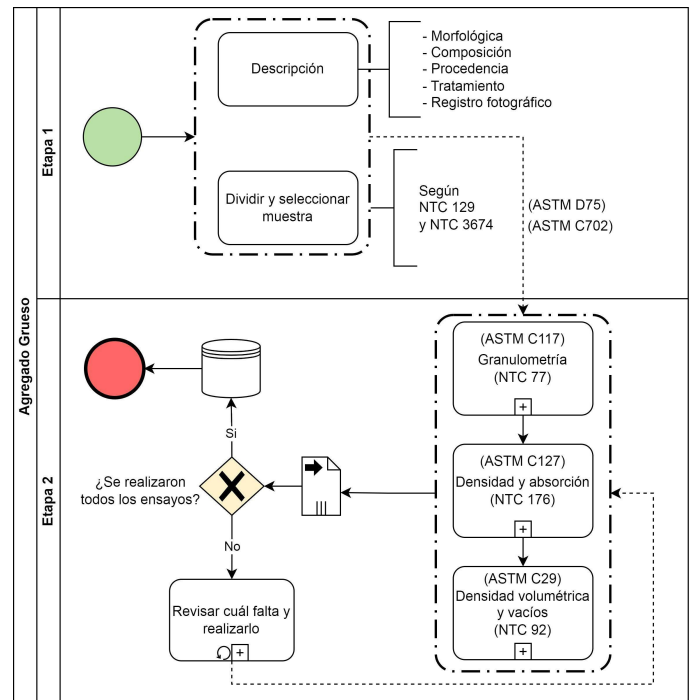


Figura 4. Proceso metodológico de caracterización AG. Fuente: Elaboración de los autores.

se identificaron dos empresas: Cemento Argos (Portland Cement Association, 2014) para el cemento y (Industrial Concreto S.A.S., 2019) para agregados finos y gruesos.

Para la constitución del inventario ambiental de los materiales, se plantea la siguiente hipótesis ambiental: *"Respectivamente los materiales agregados finos y agregados gruesos del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, por su geología y forma de extracción, presentan un DAP (Declaración Ambiental de Producto) igual a los reportados por Industrial Concreto."*

La unidad funcional declarada es una tonelada métrica para agregados finos y de igual manera para agregados gruesos, específicamente arena para concreto y agregado grueso de Tamaño máximo nominal de 19 mm y 25 mm. Los indicadores se presentan en la tabla 5.

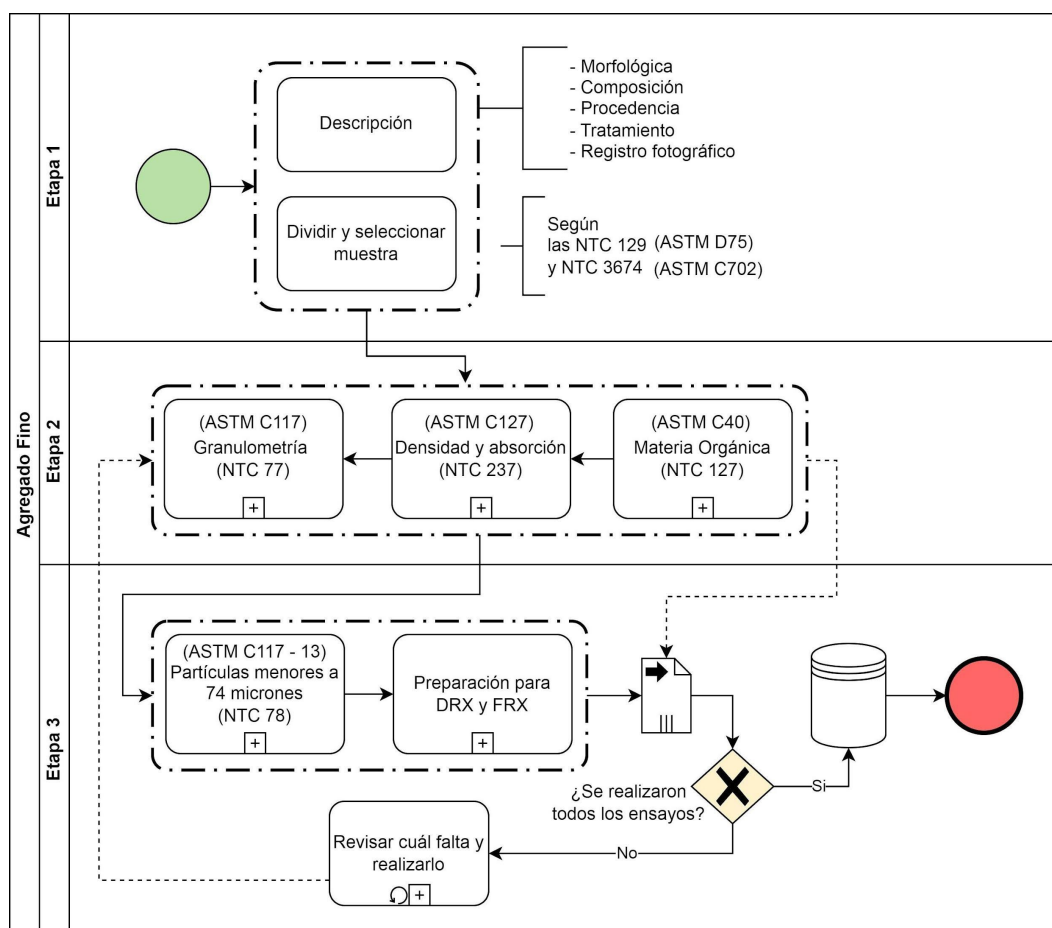


Figura 5. Proceso metodológico de caracterización AF. Fuente: Elaboración de los autores.

Tabla 5. Indicadores de impacto ambiental cemento y agregados. Fuente: Adaptado de Industrial Conconcreto S.A.S. (2019) y Portland Cement Association (2014).

Indicador	Indicador Abreviatura	Unidad	Agregado Fino	Agregado grueso	Cemento
Potencial de Calentamiento Global (100 años)	IA1	kg CO ₂ -eq	3,34	2,70	892,00
Potencial de Eutrofización agua marina	IA2	kg N-eq	0,013	0,010	1,100
Potencial de Eutrofización agua dulce ion fosfato	IA3	kg PO ₄ ³⁻ -eq.	0,006	0,004	0,000
Potencial de Eutrofización agua dulce	IA4	kg P-eq.	0,00032	0,00025	0,00000
Potencial de eutrofización, excedencia acumulada	IA5	mol N-eq.	0,130	0,107	0,000
Energía Primaria No Renovable: Fósil	IA6	MJ	56,75	42,76	4660,00
Energía Primaria Renovable: Solar, Eólica, Hidro-eléctrica, Geotérmica	IA7	MJ	6,91	6,27	95,50
Energía embebida total	IA8	MJ	63,66	49,02	5243,40
Recursos Materiales No Renovables	IA9	kg	0	0	1240
Recursos Materiales Renovables	IA10	kg	0	0	3,42
Agua Dulce Neta	IA11	m ³	301,70	145,50	9240,00
Residuos No Peligrosos Generados	IA12	kg	111,30	51,50	10,50
Residuos Peligrosos Generados	IA13	kg	0,0012	0,0011	0,0511

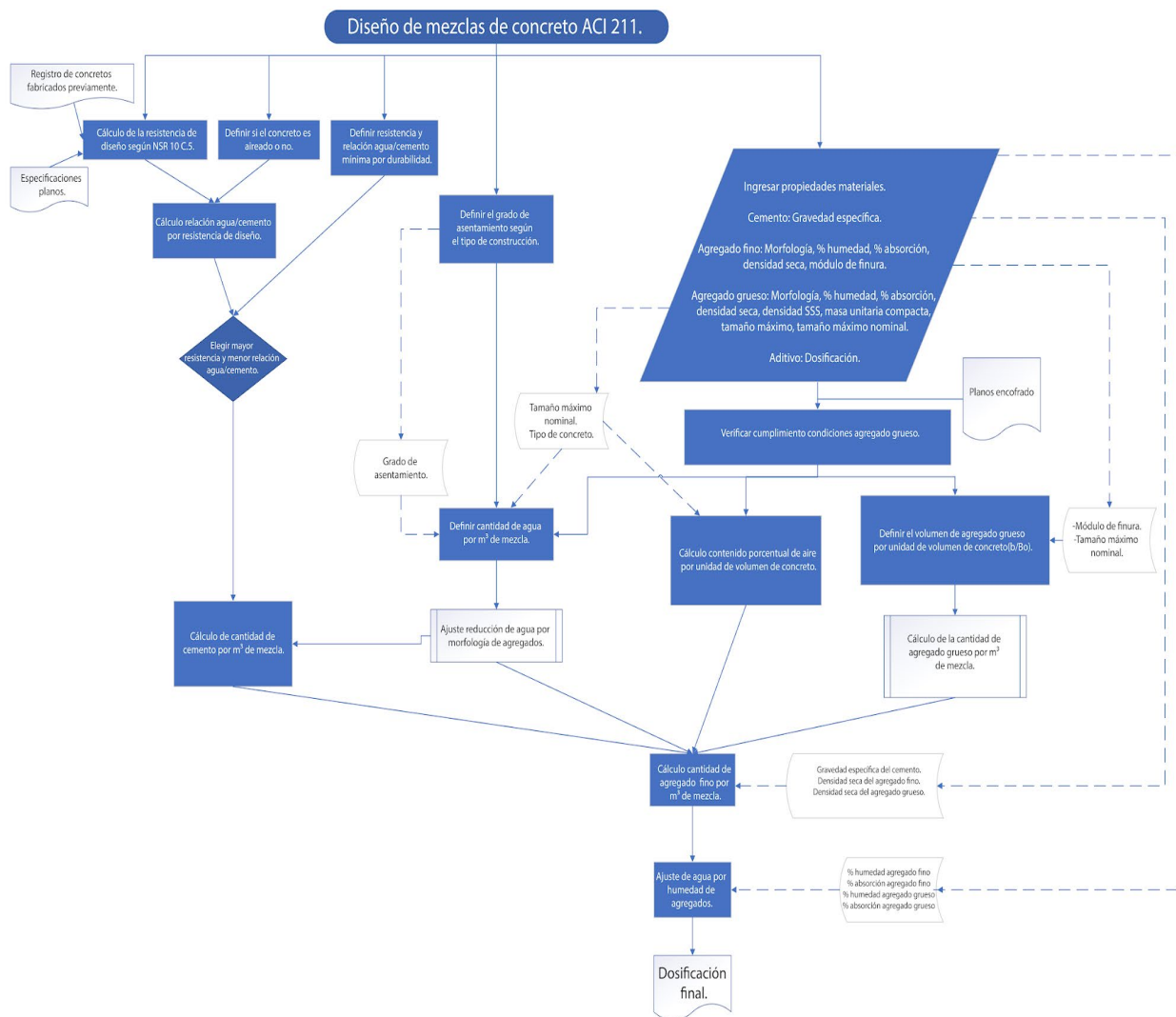


Figura 6. Esquema funcionamiento software DISMECON. Fuente: Elaboración de los autores.

CUANTIFICACIÓN AMBIENTAL Y OPTIMIZACIÓN DE MEZCLAS DE CONCRETO.

Los datos obtenidos de la caracterización ambiental de los materiales se tabularon y se alojaron en el software de base DISMECON (Restrepo et al., 2020), una herramienta que puede ser usada de manera sencilla para realizar estimaciones o aproximaciones de las cantidades iniciales de materiales para el diseño de mezclas. El software, está basado en la metodología A.C.I 211 (American Concrete Institute) y permite calcular la dosificación de los materiales de acuerdo con las condiciones de desempeño (resistencia a la compresión, durabilidad, manejabilidad) que le sean exigidas al concreto, a partir de las propiedades físicas de los agregados como densidad, peso unitario, tamaño máximo nominal, módulo de finura, densidad y absorción, entre otros (Tabla 5 y Tabla 6), y datos de las mezclas como la consistencia deseada, la aplicación del concreto, condiciones de colocación y encofrado, las condiciones de exposición, la relación a/c o la resistencia. El funcionamiento del software puede verse en la figura 6.

La herramienta informática, se modifica en su programación para incluir los datos estructurados y procesar los indicadores de los inventarios ambientales conseguidos en la tabla 5. Con esta estructura se configura el marco propuesto por NTC-ISO 14044: a) Objetivo y alcance, b) Análisis del inventario de ciclo de vida, c) evaluación del impacto de ciclo de vida y d) interpretación.

Con relación a los escenarios de optimización, se diseña un plan de optimizaciones a partir de los agregados (AF/ AG) para ello, se evaluaron 8 tipos de agregados finos (Tabla 6) y 4 tipos de agregados gruesos (Tabla 7). Para efectos de establecer una línea base en la simulación de los diseños de mezclas de concreto, se considera un concreto estructural de la menor resistencia posible de acuerdo con la norma sismo resistente del 2010 (NSR), y el menor asentamiento contemplado en la metodología de diseño de mezclas de concreto, parámetros que generan el escenario de menor demanda de cemento para este tipo de concretos y por consiguiente, las menores cargas ambientales. Los parámetros de diseño presentan la siguiente configuración:

Tabla 6. Relación tipos de optimización AF para la aplicación. Fuente: Elaboración de los autores.

Agregado Fino (AF)	Módulo de Finura [ASTM C117]	Densidad Aparente Seca (kg/m³) [ASTM C127]	Absorción (%) [ASTM C127]	Morfología
1F	3,00	2709	1,90	Triturado
2F	3,76	2620	0,87	Triturado
3F	2,70	2901	1,03	Triturado
4F	3,01	2602	2,40	Triturado
5F	3,00	2646	1,98	Triturado
6F	3,14	2550	1,21	Triturado
7F	4,00	2750	1,07	Triturado
8F	3,40	2786	0,99	Triturado

Tabla 7. Relación tipos de optimización AG para la aplicación. Fuente: Elaboración de los autores.

Agregado Grueso (AG)	Tamaño máximo (mm) [ASTM C117]	Tamaño máximo nominal (mm) [ASTM C117]	Densidad aparente seca (kg/m³) [ASTM C127]	Masa unitaria compacta (kg/m³) [ASTM C29]	Absorción (%) [ASTM C127]	Morfología
1G	50,0	37,5	2863	1499	0,24	Triturado
2G	37,5	25,0	2735	1635	1,50	Triturado
3G	25,0	19,0	2770	1610	0,86	Triturado
4G	25,0	19,0	2862	1707	0,92	Triturado

TIPO DE CONCRETO CONVENCIONAL

- Concreto no aireado.
- Resistencia de diseño 21 MPa.
- Tipo de construcción: Concreto en masa.
- Asentamiento: 50 mm.

No se incluye el análisis de los aditivos que modifican las propiedades en estado plástico, debido que el caso de estudio representa una mezcla de concreto con características mecánicas fácilmente logrables, adicionalmente los impactos reportados por la European Federation of Concrete Admixtures Associations Ltd (EFCA,2015) sólo incluyen las demandas de energía y no las cargas ambientales asociadas con los procesos químicos de los aditivos, limitando así el alcance.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CARACTERIZACIÓN AGREGADOS

Los resultados de la caracterización de los agregados provenientes de las canteras evaluadas en el Área

Metropolitana del Valle de Aburrá evidencian variación en las propiedades físicas con algunos datos atípicos que pueden estar asociados a cambios en los procesos de producción.

Para los agregados finos, se observa en la figura 7 que el valor medio del porcentaje de absorción es de 1,63 %, lo que es acorde con la metodología ACI 211, que establece un 2 % como la absorción máxima de los agregados; por otra parte, alrededor del 29 % de los datos presentan valores de absorción mayores al 2 %. Adicionalmente, los porcentajes de humedad varían entre 0 % -8 %, este rango de valores es aceptado para la elaboración de concretos. Los módulos de finura obtenidos entre 2,8 y 3,2 son valores ideales para arenas empleadas en la confección de concretos, sin embargo, se presenta el 50 % de los agregados con un Módulo de Finura (MF) entre 3,6 y 4,3, valores asociados con arenon, característicos de arenas muy gruesas que pueden inducir a mezclas de concreto muy ásperas y poco manejables. Finalmente, la Densidad Aparente Seca (DAS) presenta valores alrededor de 2100 kg/m³ y 2900 kg/m³.

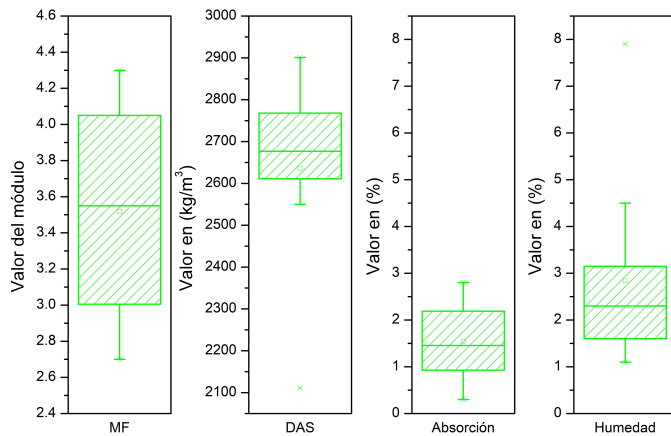


Figura 7. Caracterización propiedades Agregados Finos. Fuente: Elaboración de los autores.

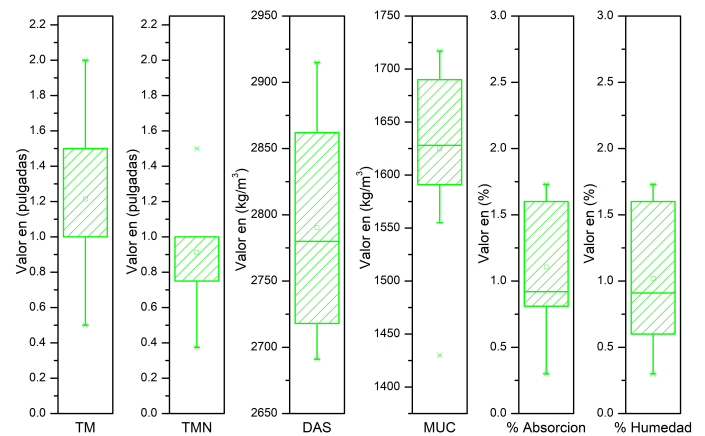


Figura 8. Caracterización propiedades Agregados Gruesos. Fuente: Elaboración de los autores.

Asimismo, se observa de la figura 8 que aproximadamente el 100 % de los agregados gruesos presentan porcentajes de absorción inferiores al 2 %, calificándolos como aptos para su utilización. El Tamaño Máximo (TM) y Tamaño Máximo Nominal (TMN) dan cuenta de la tendencia (75 %) a la producción de agregados gruesos con tamaños entre 1½" (38 mm) y 2" (50.8 mm) debido a la necesidad de cumplir, en los sistemas constructivos de concretos reforzados con acero, los requerimientos geométricos del encofrado y las distancias entre las barras de refuerzo. La Masa Unitaria Compacta (MUC), se ubicó entre 1425 kg/m³ y 1720 kg/m³ y el porcentaje de humedad entre 0 % y 1.8 %, éstos últimos en el rango de los valores aceptados para la elaboración de concretos. Al comparar la figura 7 y la figura 8, se observa para los agregados gruesos una mayor Densidad Aparente Seca (DAS) media (2790 kg/m³) respecto a los agregados finos (2628 kg/m³), lo que se asocia con la cantidad de vacíos entre las partículas de agregado fino, requiriendo en estos casos una mayor cantidad de pasta de mortero para lograr una adecuada trabajabilidad de la mezcla (Pérez et al., 2022).

DISEÑO DE MEZCLAS

El diseño del concreto, bajo las condiciones y materias primas especificadas, dio como resultado 32 posibles dosificaciones detalladas en la tabla 8. Se identificaron 3 tendencias en el consumo de cemento (266 kg, 290 kg, 316 kg), que se relacionan con el tamaño máximo del agregado grueso. Esto implica una reducción de hasta un 15,8 % en la demanda de cemento al comparar el valor máximo y mínimo, y un aumento en el consumo de agregados de hasta un 7,2 %. Además, se observa un aumento en el consumo de agua de hasta un 15,7 % al comparar el promedio de agua entre las mezclas con mayor y menor demanda de cemento. Al considerar el costo y el alto impacto ambiental del cemento, estos hallazgos sugieren la importancia de una toma de decisiones más informada por parte de los desarrolladores de proyectos de construcción, con el objetivo de optimizar tanto el costo como el impacto ambiental de las mezclas de concreto a producir.

Tabla 8. Dosificaciones de mezclas de concreto. Fuente: Elaboración de los autores.

Id Mezcla	Mezcla	Dosificación Concreto				Cantidades x 1 m³ de Concreto						
		Cemento (partes)	Agregado Fino (partes)	Agregado Grueso (partes)	Relación agua/cemento	Cemento (kg)	Agregado Fino (kg)	Agregado Grueso (kg)	Agregados Total (kg)	Promedio Agregados Total (kg)	Agua (L)	Promedio Agua (L)
1	3F1G	1	4,408	4,057	0,555	266	1172,6	1079,3	147,7	2165,1	157,1	152,8
2	8F1G	1	4,618	3,663	0,555	266	1228,3	974,4	147,5		145,7	
3	7F1G	1	4,883	3,325	0,56	266	1298,8	884,4	149		147,7	
4	1F1G	1	4,277	3,888	0,591	266	1137,6	1034,3	157,1		161,7	
5	5F1G	1	3,646	4,463	0,62	266	969,8	1187,2	164,9		164,9	
6	4F1G	1	4,113	3,883	0,608	266	1094	1032,8	161,7		148,6	
7	2F1G	1	4,528	3,46	0,548	266	1204,5	920,4	145,7		149	
8	6F1G	1	4,096	3,809	0,559	266	1089,5	1013,3	148,6		147,5	

Id Mezcla	Mezcla	Dosificación Concreto				Cantidades x 1 m³ de Concreto						
		Cemento (partes)	Agregado Fino (partes)	Agregado Grueso (partes)	Relación agua/cemento	Cemento (kg)	Agregado Fino (kg)	Agregado Grueso (kg)	Agregados Total (kg)	Promedio Agregados Total (kg)	Agua (L)	Promedio Agua (L)
9	3F2G	1	3,451	3,834	0,593	290	1000,7	1111,8	172	2040,0	179,6	174,6
10	8F2G	1	3,716	3,439	0,588	290	1077,6	997,4	170,6		168,4	
11	7F2G	1	4,008	3,101	0,589	290	1162,3	899,3	170,9		172	
12	1F2G	1	3,39	3,665	0,619	290	983	1062,8	179,6		183,6	
13	5F2G	1	3,311	3,665	0,621	290	960,2	1062,8	180		180	
14	4F2G	1	3,261	3,659	0,633	290	945,8	1061,1	183,6		172,1	
15	2F2G	1	3,689	3,24	0,581	290	1069,8	939,5	168,4		170,9	
16	6F2G	1	3,264	3,586	0,593	290	946,7	1039,9	172,1		170,6	
17	3F4G	1	3,253	3,403	0,565	316	1027,9	1075,4	178,5	2008,9	185,9	181,3
18	3F3G	1	3,341	3,21	0,562	316	1055,7	1014,3	177,6		175	
19	8F4G	1	3,492	3,025	0,562	316	1103,4	955,9	177,7		177,6	
20	1F4G	1	3,191	3,241	0,59	316	1008,3	1024,2	186,6		190,1	
21	7F4G	1	3,758	2,701	0,565	316	1187,6	853,5	178,6		186,2	
22	8F3G	1	3,567	2,872	0,56	316	1127,2	907,6	176,9		178,1	
23	5F4G	1	3,117	3,241	0,592	316	984,9	1024,2	186,9		177,9	
24	7F3G	1	3,824	2,547	0,563	316	1208,5	805	177,9		176,9	
25	1F3G	1	3,269	3,057	0,588	316	1033	966	185,9		186,6	
26	4F4G	1	3,07	3,236	0,603	316	970	1022,5	190,7		175,8	
27	2F4G	1	3,462	2,831	0,556	316	1093,9	894,5	175,8		178,5	
28	5F3G	1	3,193	3,057	0,589	316	1009	966	186,2		190,7	
29	6F4G	1	3,071	3,166	0,566	316	970,4	1000,3	178,9		186,9	
30	4F3G	1	3,145	3,052	0,602	316	993,7	964,4	190,1		178,9	
31	2F3G	1	3,528	2,67	0,554	316	1114,8	843,6	175		178,6	
32	6F3G	1	3,143	2,986	0,564	316	993,1	943,5	178,1		177,7	

La figura 9. ilustra el comportamiento de los consumos de materiales de las distintas dosificaciones para un concreto de 21 MPa, de la tabla 8. Se evidencia una reducción en la demanda del agua promedio de hasta un 15,7 %, al disminuir el consumo de cemento de éstas. Adicionalmente, las mezclas con una misma cantidad de consumo de cemento pueden llegar a optimizarse al reducir el consumo promedio de agregados en hasta un 6,6 %. Evidenciándose de esta manera que, la correcta elección y combinación de los materiales para elaborar mezclas de concreto puede generar economías y sus respectivos beneficios sin requerir mayores esfuerzos.

CUANTIFICACIÓN ECONÓMICA

El costo por metro cúbico de cada proporción de mezcla de concreto de 21 MPa se calculó utilizando los valores unitarios expresados en USD/kg de las materias primas usadas en cada mezcla. Los valores

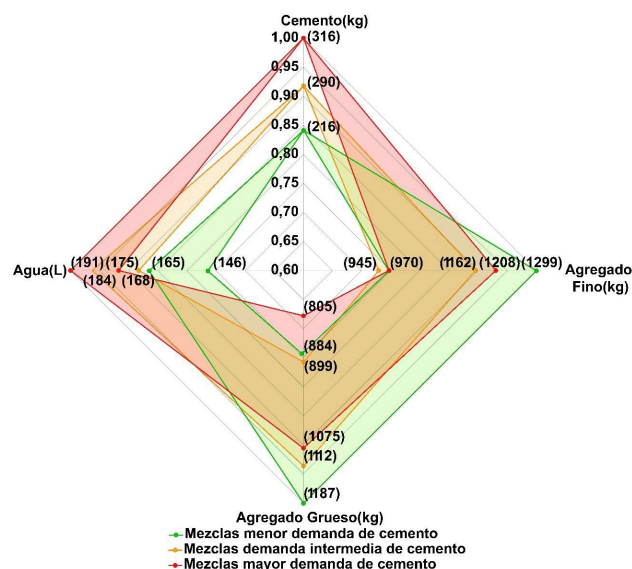


Figura 9. Relación consumo de materiales de diferentes mezclas para un mismo objetivo de resistencia 21 MPa. Fuente: Elaboración de los autores.

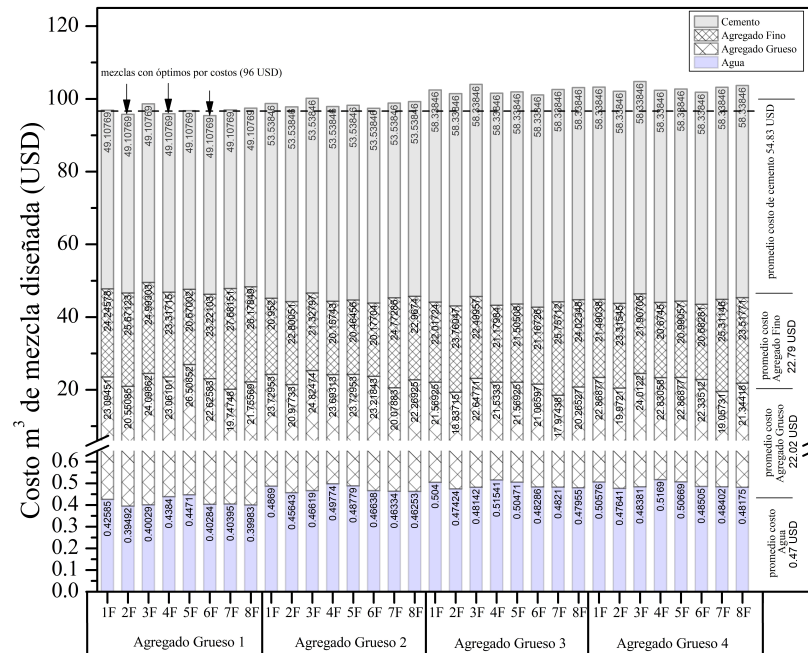


Figura 10. Costo mezclas de concreto. Fuente: Elaboración de los autores.

comerciales, a marzo del año 2024, de los insumos primarios en Colombia se convirtieron mediante un factor de equivalencia de 3900 pesos colombianos por dólar americano. Al analizar la eficiencia económica de las distintas mezclas de concreto propuestas, como se observa en la Figura 10, el costo de la materia prima para 1 m³ de concreto varía entre 95,36 USD y 104,74 USD, lo que representa una optimización económica de hasta un 9 %. Se evidencia que esta reducción está directamente asociada a la disminución en la demanda de cemento, que constituye el componente más costoso. Además, se observa que la mezcla 6F1G, que tiene el menor costo, logra un equilibrio en los costos de los agregados y presenta el menor consumo entre las mezclas que comparten el mismo índice de consumo de cemento.

CUANTIFICACIÓN AMBIENTAL

La mezcla de menor costo de producción (6F1G) exhibe, en su mayoría, menores impactos ambientales en términos de emisiones de CO₂-eq, O₃-eq, energía embebida y consumo de agua dulce. Lo anterior se evidencia en la figura 11, construida a partir de la evaluación de los impactos ambientales de las 32 mezclas diseñadas y utilizando el inventario ambiental de los materiales (cemento y agregados). En contraste, dado al incremento en la demanda de agregados en esta mezcla y al proceso de producción de éstos, el análisis demuestra mayores niveles de contaminación del agua en lagos, balsas, ríos y embalses, registrándose impactos más significativos en términos de eutrofización y generación de residuos no peligrosos.

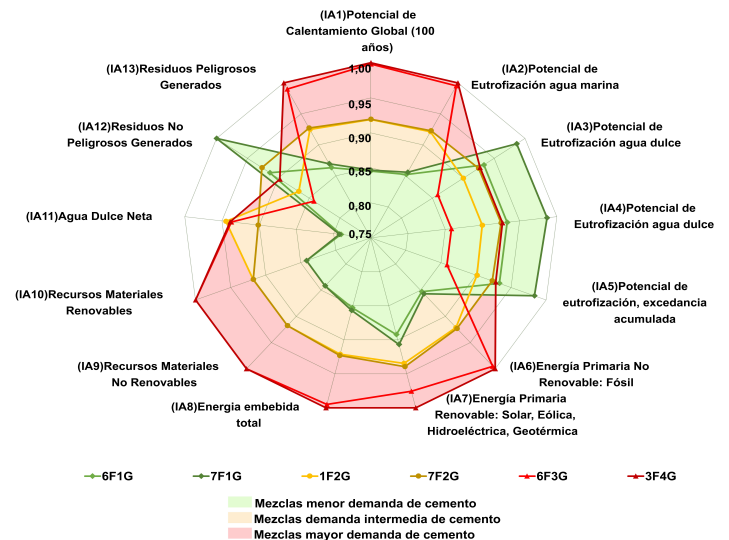


Figura 11. Relación impactos ambientales mezclas de concreto. Fuente: Elaboración de los autores.

En la figura 12, se presenta la cuantificación de los impactos ambientales asociados a la producción de 1 m³ de concreto de acuerdo con las especificaciones del tipo de concreto convencional planteadas (21 MPa). Se resaltan las emisiones de CO₂-eq, que oscilan entre 243,7 kg y 288,2 kg, la energía total embebida, variando de 1513,8 MJ a 1775,1 MJ, y el consumo de agua dulce, que se sitúa entre 156,8 L y 200 L. Estos valores sugieren la posibilidad de lograr reducciones del 15,4 % en las emisiones de CO₂, del 14,7 % en la energía embebida y del 21,5 % en el consumo de agua dulce.

Mezcla	IA 1	IA 2	IA 3	IA 4	IA 5	IA 6	IA 7	IA 8		IA 9	IA 10	IA 11	IA 12	IA 13	
	kg CO2-eq	Promedio kg CO2-eq	kg N-eq	kg PO43-eq.	kg P eq.	mol N eq.	MJ	MJ	MJ	Promedio MJ	kg	kg	L	kg	kg
1F1G	243,9	243,9	0,320	0,0109	0,0006	0,3	1348,3	39,7	1517,9	1517,7	329,8	0,9	166,8	182,7	0,016
2F1G	243,8		0,320	0,0108	0,0006	0,3	1347,3	39,5	1516,5		329,8	0,9	155,4	184,2	0,016
3F1G	244,1		0,321	0,0113	0,0006	0,3	1352,3	40,3	1522,3		329,8	0,9	157,4	188,9	0,016
4F1G	243,7		0,319	0,0107	0,0006	0,3	1345,8	39,4	1515,0		329,8	0,9	171,4	177,7	0,016
5F1G	243,7		0,319	0,0107	0,0006	0,3	1345,4	39,5	1514,7		329,8	0,9	174,6	171,9	0,016
6F1G	243,7		0,319	0,0106	0,0006	0,3	1344,7	39,3	1513,8		329,8	0,9	158,3	176,2	0,016
7F1G	244,0		0,321	0,0112	0,0006	0,3	1351,1	39,9	1520,8		329,8	0,9	158,7	192,9	0,016
8F1G	244,0		0,321	0,0112	0,0006	0,3	1350,9	40,0	1520,7		329,8	0,9	157,2	189,7	0,016
1F2G	264,8	264,8	0,345	0,0102	0,0006	0,2	1452,6	41,1	1635,3	1635,5	359,6	1,0	189,3	167,2	0,017
2F2G	264,8		0,345	0,0101	0,0006	0,2	1452,3	41,0	1634,7		359,6	1,0	178,1	170,5	0,017
3F2G	265,0		0,346	0,0105	0,0006	0,2	1455,7	41,6	1638,8		359,6	1,0	181,7	171,7	0,017
4F2G	264,7		0,345	0,0100	0,0006	0,2	1450,4	40,9	1632,8		359,6	1,0	193,3	163,0	0,017
5F2G	264,8		0,345	0,0101	0,0006	0,2	1451,3	41,0	1633,8		359,6	1,0	189,6	164,6	0,017
6F2G	264,7		0,344	0,0099	0,0006	0,2	1449,6	40,8	1631,8		359,6	1,0	181,7	162,0	0,017
7F2G	265,0		0,346	0,0105	0,0006	0,2	1455,8	41,4	1638,7		359,6	1,0	180,6	178,7	0,017
8F2G	265,0		0,346	0,0104	0,0006	0,2	1455,2	41,4	1638,1		359,6	1,0	180,3	174,3	0,017
1F3G	287,9	288,0	0,374	0,0100	0,0006	0,2	1572,5	43,4	1770,0	1770,8	391,8	1,1	195,6	168,0	0,019
2F3G	287,9		0,373	0,0100	0,0006	0,2	1571,9	43,2	1769,2		391,8	1,1	184,6	170,8	0,018
3F3G	288,1		0,374	0,0104	0,0006	0,2	1575,8	43,8	1773,8		391,8	1,1	187,3	173,0	0,019
4F3G	287,8		0,373	0,0098	0,0006	0,2	1570,2	43,1	1767,5		391,8	1,1	199,8	163,6	0,018
5F3G	287,9		0,373	0,0099	0,0006	0,2	1571,1	43,2	1768,5		391,8	1,1	195,9	165,4	0,018
6F3G	287,7		0,373	0,0097	0,0006	0,2	1569,3	43,0	1766,4		391,8	1,1	187,8	162,4	0,018
7F3G	288,1		0,374	0,0103	0,0006	0,2	1575,6	43,6	1773,3		391,8	1,1	187,5	179,3	0,019
8F3G	288,1		0,374	0,0103	0,0006	0,2	1575,3	43,7	1773,2		391,8	1,1	186,6	175,5	0,019
1F4G	288,0	288,0	0,374	0,0102	0,0006	0,2	1573,6	43,6	1771,3	1770,8	391,8	1,1	196,3	168,3	0,019
2F4G	287,9		0,374	0,0101	0,0006	0,2	1572,9	43,3	1770,4		391,8	1,1	185,4	171,1	0,019
3F4G	288,2		0,375	0,0105	0,0006	0,2	1576,9	44,0	1775,1		391,8	1,1	188,2	173,1	0,019
4F4G	287,9		0,373	0,0099	0,0006	0,2	1571,3	43,3	1768,8		391,8	1,1	200,4	163,9	0,018
5F4G	287,9		0,374	0,0100	0,0006	0,2	1572,2	43,4	1769,8		391,8	1,1	196,6	165,7	0,019
6F4G	287,8		0,373	0,0098	0,0006	0,2	1570,4	43,2	1767,7		391,8	1,1	188,6	162,8	0,018
7F4G	288,1		0,374	0,0104	0,0006	0,2	1576,4	43,7	1774,4		391,8	1,1	188,2	179,4	0,019
8F4G	288,1		0,374	0,0104	0,0006	0,2	1576,0	43,8	1774,0		391,8	1,1	187,4	175,4	0,019
Escala impactos: Menor				Intermedio				Mayor							

Escala impactos: Menor Intermedio Mayor

Figura 12. Cuantificación de impactos ambientales en mezclas de concreto. Fuente: Elaboración de los autores.

Asimismo, en la Figura 13 se puede observar la relación entre la disminución del costo de producción en la mezcla de concreto con la disminución en las emisiones de CO₂, energía embebida y agua dulce. Adicionalmente, los valores de ecoindicadores se determinaron en función del costo de producción respecto de las categorías de impacto Potencial de Calentamiento Global y Energía Total Embebida, como se evidencia en la Figura 14, donde el mejor desempeño en las mezclas, son precisamente las más económicas y las que requieren menos cemento Portland para lograr la misma resistencia mecánica. Esto demuestra, no sólo por factores ambientales, sino también por factores económicos, el beneficio que tiene este tipo de iniciativas a la hora de elegir los agregados para la elaboración del concreto en las obras. Si bien, el trabajo desarrollado establece una metodología que muestra una cuantificación

de impactos ambientales para aplicar a mezclas de concreto diseñadas para 21 MPa, es posible utilizarla en distintas resistencias y especificaciones, permitiendo establecer indicadores de impacto ambiental más coherentes con la realidad local y cuyo potencial uso puede escalarse a otras latitudes que dispongan de la declaración ambiental de producto (DAP) de materiales y usen la metodología A.C.I para el diseño de mezclas de concreto.

Teniendo en cuenta que sólo en el año 2023 se produjeron alrededor de 89376 m³ de concreto premezclado en el Área Metropolitana del Valle de Aburra (DANE, 2023), si esta cantidad de concreto se optimiza utilizando la metodología empleada, comparando el caso más desfavorable con el más favorable, se podría lograr un ahorro estimado de alrededor de \$838346,88 dólares americanos. Además, se podrían evitar emisiones de

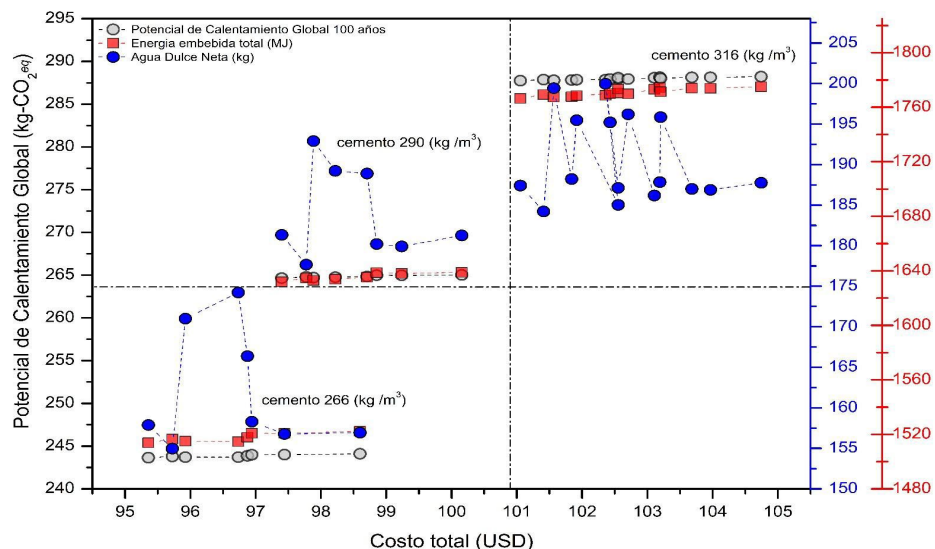


Figura 13. Relación costo-impacto ambiental en mezclas de concreto de 21 MPa. Fuente: Elaboración de los autores.

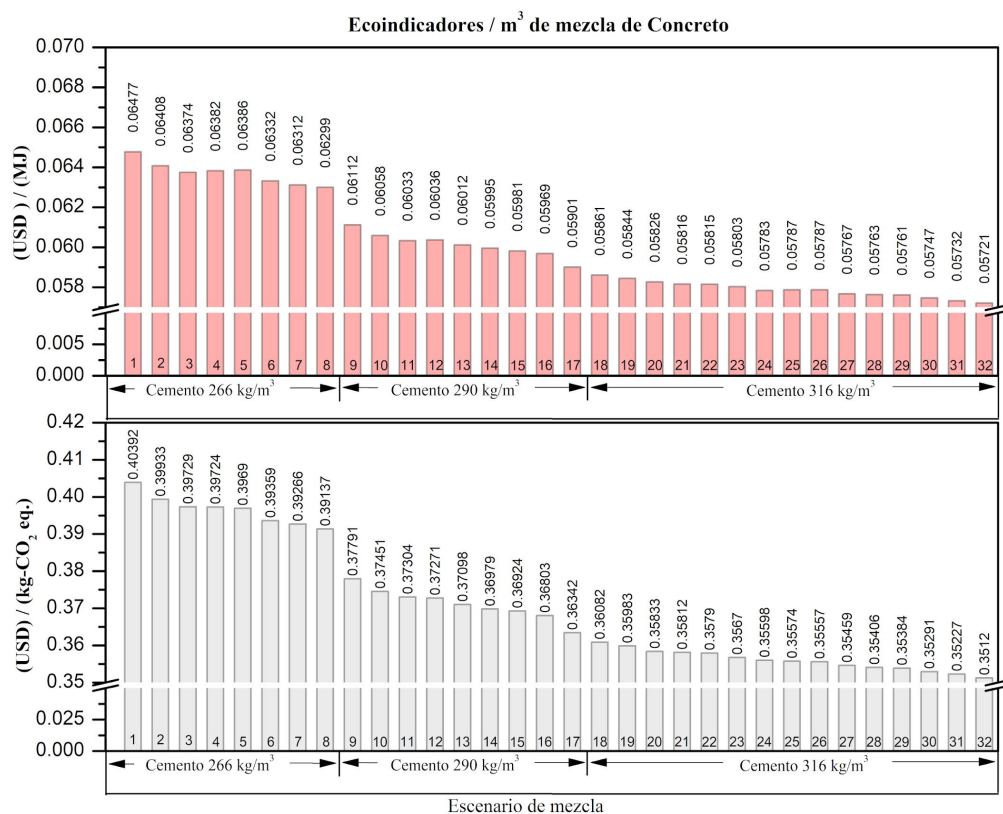


Figura 14. Gráfico ecoeficiencia mezclas de concreto de 21 MPa. Fuente: Elaboración de los autores.

aproximadamente 3977 toneladas de CO₂, ahorrar 23354 GJ de energía y conservar 4022 toneladas de agua dulce. Este enfoque no sólo beneficiaría al sector de la construcción, sino que proporcionaría una ruta alternativa para la mitigación de los impactos ambientales asociados con esta industria.

DISCUSIÓN

La presente investigación, pone de manifiesto la posibilidad de cuantificar y optimizar económica y ambientalmente algunos procesos de producción en la industria de la construcción. Para lograrlo, se requiere la integración de todos los actores involucrados en ella. Esto incluye a los productores de materia prima, su nivel de formalización y la adopción de buenas prácticas, como las declaraciones ambientales de sus productos (DAP). También el gremio transportista y las características de su parque automotor. Asimismo, los diseñadores, tanto arquitectónicos como estructurales, con las implicaciones técnicas de los requerimientos geométricos del encofrado y las distancias entre las barras de refuerzo, estipulan el tamaño máximo del agregado grueso a emplear en la mezcla de concreto. Este parámetro, toma relevancia ya que, determina la cantidad de cemento requerida y su impacto ambiental correspondiente. Además, se deben presentar aspectos de sostenibilidad en los comités de obra, que permita a los gerentes de obra desempeñar un papel crucial en la correcta planificación y selección de proveedores de materia prima, teniendo en cuenta estudios como los propuestos en el presente trabajo, mientras que los constructores tienen la responsabilidad de materializar lo planificado y programado.

De esta manera, bajo el contexto de la metodología A.C.I en el diseño de mezcla de concreto, pudo integrarse el ACV para desarrollar una herramienta que permita optimizar la selección de materiales, sin embargo, existen normativas y metodologías de diseño de mezclas de concreto de otros continentes que pueden acoplarse e implementar iniciativas de este tipo. El proceso de optimización implementado permitió identificar las mejores condiciones económicas y ambientales para el diseño de una mezcla para un concreto de 21 MPa, definiendo la selección de agregados finos y gruesos procedentes de cantera. Si bien, se encuentra la mejor ruta, esto limita la implementación futura a una o dos fuentes de cantera, lo que obliga a las demás canteras a mejorar el proceso productivo implementando tecnologías innovadoras que conlleven a definir las DAP y disminuir los impactos ambientales desde la cuna. Adicionalmente de acuerdo con el A.C.I para una resistencia específica del concreto, las mezclas que presentan mayor TM del agregado grueso

requieren menor dosificación de cemento. Este es un factor para tener en cuenta en los sistemas de producción de concreto, ya que la literatura técnica evidencia que el cemento es el indicador que más eleva costos y genera impactos ambientales. Así los constructores están llamados a analizar cada uno de los componentes técnicos, económicos y ambientales en función del proyecto a ejecutar.

Tanto la energía embebida como el calentamiento global muestran respuestas similares en cada una de las tres familias de mezclas debido a la demanda de cemento. En muchos casos, se observa una relación inversa entre el agua y los indicadores de calentamiento global y energía embebida, este patrón está asociado a la alta dependencia de las características intrínsecas de los agregados, como su morfología y su grado de absorción. Además, los resultados demuestran la mayor eutrofización y generación de residuos peligrosos provenientes de los agregados para las mezclas más óptimas, esto puede estar asociado a la puesta a punto de los agregados, ya que principalmente el lavado del material elimina partículas de tamaño inferior a 75 µm como limos y arcillas. Este proceso, es requerido en los agregados como un parámetro de control de calidad y en la mayoría de los casos este material particulado es llevado a los afluentes en forma de lodo. Lo anterior puede ser un foco de investigación para recuperar lodos y desarrollar procesos de aprovechamiento.

Aunque la hipótesis ambiental planteada permitió el desarrollo de la herramienta de optimización, los campos asociados al DAP de todos los materiales debe ser validado, lo que evidencia un esfuerzo amplio por parte de las empresas privadas y el sector público con la responsabilidad civil, social y natural que implica la explotación de minería para los materiales de construcción.

De acuerdo con la tabla 9, los resultados obtenidos en esta investigación son acordes con los resultados alcanzados con otras herramientas desarrolladas para la cuantificación del impacto ambiental de mezclas de concreto. Al comparar los resultados de energía embebida obtenidos en este estudio con los resultados de la simulación en la herramienta *"Green Concrete LCA web tool"* (Berkeley, s.f.), se evidencia una diferencia inferior al 0.85% para todas las mezclas evaluadas. Estos resultados son muy similares, debido a que las DAP del cemento reportadas por los productores en Colombia, son equivalentes a las DAP de la PCA (Portland Cement Association, 2014). Sin embargo, en la comparación de las emisiones de CO₂ se evidencia una diferencia aproximada del 13%. Si bien, esta diferencia entre los resultados de ambas herramientas puede catalogarse como pequeña,

Tipo de mezcla (kg cemento portland / m³ de mezcla de concreto)	Herramienta de cálculo			
	Desarrollada por Autores - Fase 2 (Figura 3)		Green Concrete LCA web Tool *	
	GWP: Promedio (kg CO ₂ -eq)	NRE: Promedio (MJ)	GWP: Promedio (kg CO ₂ -eq)	NRE: Promedio (MJ)
266	243,90	1517,70	280,74	1512,53
290	264,80	1635,50	304,79	1629,23
316	288,00	1770,80	330,97	1755,45

* Simulación mayo 26 de 2024, sin transporte y haciendo uso de cemento Portland tipo I.

Tabla 9. Comparativo cuantificación impacto ambiental otras herramientas. Fuente: Elaboración de los autores.

es resultado de una carga ambiental sitio-específica que puede depender de los procesos de extracción y producción de agregados en la región de estudio.

Para determinar modelos de sistemas con miradas más holísticas, es necesario incorporar tres aspectos: i) Uso de equipos y la tecnología asociada al diseño de mezclas de concreto en obra, ya que los consumos de energía y la obsolescencia tecnológica pueden ir en detrimento de la optimización de las mezclas. ii) Uso de aditivos para modificar propiedades reológicas de las mezclas y disminuir consumos de cemento y uso de adiciones activas que mejoran el desempeño del cemento. iii) Transporte asociado a los materiales desde la fuente hasta la obra, lo cual podría modificar en gran medida los valores obtenidos del costo e impactos por mezcla evaluada. Esto debido a la tendencia de un parque automotor antiguo con prevalencia del uso de diésel, que resulta menos eficiente, generando mayores emisiones de CO₂. Además se deben analizar variables como las cargas transportadas y la relación entre la densidad y el esfuerzo por kilómetro transportado. Finalmente, es necesario implementar el análisis propuesto en mezclas de concreto con requerimientos de resistencia y durabilidad mayores. De esta manera, es posible evaluar el gran potencial y cuantificar los posibles beneficios económicos y ambientales que se pueden obtener al llevar a cabo este tipo de análisis mediante la programación de herramientas informáticas que permiten la creación de inventarios e interacción de gran flujo de datos.

CONCLUSIONES

La implementación e integración de herramientas que empleen datos parametrizados permiten

identificar un gran potencial de innovación en los distintos programas de dosificación de mezclas de concreto como el software DISMECON la sinergia entre estos conocimientos permite establecer un nuevo programa para cuantificar las emisiones de CO₂ y otras categorías de impacto ambiental.

A partir del diseño de mezclas y la consideración de los datos de ubicación de las fuentes de origen de los agregados, junto con las correlaciones de optimización según sus características, permiten proyectar no sólo los potenciales impactos en cada una de las categorías de los DAP utilizados, sino también realizar estimaciones en cuanto al costo de la producción del concreto. Estas estimaciones se basan en las distintas combinaciones de estos materiales, lo que hace que el proceso sea muy atractivo para la eficiencia económica en la producción de mezclas de concreto. Además, promueve la toma adecuada de decisiones sobre las necesidades de resistencia y consumo de cemento.

El modelado permitió identificar procesos de optimización en el uso de agregados para la fabricación de mezclas de concreto y establecer los efectos de las cargas ambientales al usar agregados con diferentes tamaños. Se encuentran mayores impactos de emisiones de CO₂ y demanda de energía embebida asociados a los consumos incrementales de cemento en las mezclas, éste a su vez, es más demandado en los diseños de mezclas que utilizan agregado grueso de menor tamaño máximo, lo que implica mayores costos y emisiones de CO₂ hasta un 15% mayores que si utilizan agregados gruesos inmediatamente de mayor tamaño máximo.

Las mezclas de concreto con menor impacto ambiental son a su vez las más económicas, dado que se realiza un análisis de propiedades (caracterizaciones) de los agregados y en función de

éstos una mejor proporcionalidad de cemento, lo que demuestra que la sostenibilidad y la eficiencia económica son compatibles y tienen un alto valor agregado para el sector de la construcción.

Se espera que el desarrollo presentado en esta investigación contribuya a promover estrategias para la mitigación de los gases de efecto invernadero (GEI) en el sector de la construcción. Además de, evidenciar la necesidad de adoptar metodologías de trabajo colaborativo entre todos los actores del sector de la construcción, resaltando su potencial y los beneficios que pueden generar.

La investigación evidencia que, es posible disminuir los impactos ambientales a partir de que los Análisis de Ciclo de Vida (ACV) se basen en evaluaciones a nivel de la utilización y optimización adecuada de los materiales, como los concretos, de manera que sean escalables y comparables, en lugar de depender exclusivamente de la implementación de tecnologías y materiales innovadores en el futuro; contribuyendo de manera efectiva en la reducción de emisiones y al avance hacia un entorno construido más sostenible, más acorde con las conclusiones de Olsson et al.(2024) sobre la necesidad de fortalecer los procesos, para incluir posteriormente materiales innovadores de bajas emisiones.

TRABAJOS FUTUROS

En los trabajos futuros, se deberá incluir el transporte para tener en cuenta las cargas ambientales sitio-específicas, dado que, en el presente trabajo no se exploraron distintas opciones de transporte ni se determinó cuánto representa su impacto en el ciclo de vida respecto al total de los impactos. Además, será fundamental incorporar residuos de construcción y demolición en los procesos, adoptando una perspectiva de ingeniería circular para maximizar la reutilización de materiales y minimizar los residuos. Se deberán desarrollar ecoindicadores específicos para el sector de la construcción que sean complementarios y faciliten procesos de normalización, permitiendo la comparación e implementación de éstos en otras latitudes. La herramienta tendrá que llevarse a nivel de producción, integrando estos trabajos futuros para ofrecer una solución más completa y sostenible en la industria de la construcción.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por la Facultad de Arquitectura y el Laboratorio de Construcción de la

Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín bajo los proyectos de investigación HERMES 57148 y 56944. También agradecemos a las empresas productoras de agregados que se hicieron parte del proyecto, al equipo de trabajo del grupo de investigación en Innovación y Gestión de la Construcción (IGC) y al Semillero Investigación en Gestión de la Construcción (SIGCON).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agusti-Panareda, A., Diamantakis, M., Massart, S., Chevallier, F., Muñoz Sabater, J., Barré, J., Curcoll, R., Engelen, R., Langerock, B., Law, R., Loh, Z., Morgu, J., Parrington, M., Peuch, V.-H., Ramonet, M., Roehl, C., Vermeulen, A., Warneke, T., y Wunch, D. (2019). Modelling CO2 weather – why horizontal resolution matters. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(11), 7347-7376. <https://doi.org/10.5194/acp-19-7347-2019>

Ajayi, B. L., y Babafemi, A. J. (2024). Effects of Waste Plastic and Glass Aggregates on the Strength Properties of Ambient-Cured One-Part Metakaolin-Based Geopolymer Concrete. *Applied Sciences*, 14(5). <https://doi.org/10.3390/app14051856>

Alcaldía de Medellín. (2020). PLAN DE ACCIÓN CLIMÁTICA MEDELLÍN 2020-2050. <https://www.medellin.gov.co/es/secretaria-medio-ambiente/cambio-climatico/#:~:text=El%20Plan%20de%20Acci%C3%B3n%20Clim%C3%A1tica,aporte%20al%20logro%20de%20la>

Alcaldía de Medellín. (2021). Plan de Acción Climática (PAC) 2020-2050. <https://www.medellin.gov.co/es/secretaria-medio-ambiente/cambio-climatico/#:~:text=El%20Plan%20de%20Acci%C3%B3n%20Clim%C3%A1tica,aporte%20al%20logro%20de%20la>

AMVA. (2015). Política Pública de Construcción Sostenible 1. Línea Base. https://www.metropol.gov.co/ambiental/Documents/Construccion_sostenible/PPCSILineaBase27112015.pdf

AMVA. (2017). Plan Integral de Gestión de la Calidad del Aire para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (PIGECA 2017-2030). <https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Paginas/Gestion-integral/PIGECA.aspx>

Asoareas. (2021). Mapa general localización Área Metropolitana del Valle de Aburrá. <https://Asoareas.Com.Co/Alianzas-Estrategicas/Area-Metropolitana-Del-Valle-de-Aburra/>

Azari, R. (2019). Life Cycle Energy Consumption of Buildings; Embodied + Operational. *Sustainable Construction Technologies: Life-Cycle Assessment*, 123-144. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811749-1.00004-3>

Belaïd, F. (2022a). How does concrete and cement industry transformation contribute to mitigating climate change challenges? *Resources, Conservation y Recycling Advances*, 15, 200084. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2022.200084>

Belaïd, F. (2022b). Implications of poorly designed climate policy on energy poverty: Global reflections on the current surge in energy prices. *Energy Research & Social Science*, 92, 102790. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102790>

Berkeley. (s.f.). Green Concrete LCA Web Tool. <https://greenconcrete.berkeley.edu/>

Boccia, F., y Sarnacchiaro, P. (2018). The Impact of Corporate Social Responsibility on Consumer Preference: A Structural Equation Analysis. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 25(2), 151–163. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/csr.1446>

Bohvalovs, G., Kalnbalkīte, A., Vanaga, R., Kirsanovs, V., Lauka, D., Pakere, I., Prodanuks, T., Laktuka, K., Dolge, K., Zundāns, Z., Brēmane, I., Blumberga, D., y Blumberga, A. (2023). Increasing Sustainability in Vocational Education System: Latvia Case Study. CONECT. International Scientific Conference of Environmental and Climate Technologies, 0, 32. <https://doi.org/10.7250/CONNECT.2023.014>

Bush, E., Flato, C., Gillett, J., Greenan, N., James, B. J. W., y Kirchmeier-Young. (2022). Canada's Changing Climate Report in Light of the Latest Global Science Assessment. <https://www.nrcan.gc.ca/environment/impacts->

Construction Leadership Council (CLC). (2016). Guidance Document for PAS 2080.

Chertow, M. R. (2004). Industrial Symbiosis. *Encyclopedia of Energy*, 407–415. <https://doi.org/10.1016/B0-12-176480-X/00557-X>

Crowther, D., y Seifi, S. (2022). The Equal Pillars of Sustainability. Emerald Publishing Limited. <https://books.google.com.co/books?id=G8C3zgEACAAJ>

Damiani, M., Ferrara, M., y Ardente, F. (2022). Understanding Product Environmental Footprint and Organisation Environmental Footprint methods. <https://doi.org/10.2760/11564>

DANE. (2023). Boletín técnico.

Das, A., Kumar, S., Sharma, P., y Sharma, N. (2023). Environmental Effects of Cement Production: A Review. In A. K. Shukla, B. P. Sharma, A. Arabkoohsar, y P. Kumar (Eds.), *Recent Advances in Mechanical Engineering* (pp. 597–608). Springer Nature Singapore.

De Andrade Salgado, F., y De Andrade Silva, F. (2022). Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete: A review. *Journal of Building Engineering*, 52, 104452. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104452>

Del Rey Castillo, E., Almesfer, N., Saggi, O., y Ingham, J. (2020). Light-weight concrete with artificial aggregate manufactured from plastic waste. *Construction and Building Materials*, 265, 120199. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120199>

Departamento Nacional de Planeación. (2018). CONPES 3919 POLÍTICA NACIONAL DE EDIFICACIONES SOSTENIBLES.

Duque, J. A. (2020). Medición del impacto ambiental de bloques de suelo-cemento, bloques cerámicos y bloques de concreto por el método de análisis de ciclo de vida. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/79160>

EFCA. (2015). Environmental Product Declaration: Concrete Admixtures—Plasticizers and Superplasticizers (Berlin, Germany: European Federation of Concrete Admixtures Association Ltd)

European Commission. (2021). *Understanding Product Environmental Footprint and Organisation Environmental Footprint methods*. https://green-business.ec.europa.eu/environmental-footprint-methods_en

Europäische Kommission Statistisches Amt. (2018). Economy-wide material flow accounts handbook. 2018 edition, Luxembourg: Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2785/158567>

Ghadir, P., Zamanian, M., Mahbubi Motlagh, N., Saberian, M., Li, J., y Ranjbar, N. (2021). Shear strength and LCA of volcanic ash-based geopolymers and cement stabilized soil: a comparative study. *Transportation Geotechnics*, 31, 100639. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100639>

Goyal, H., Kumar, R., y Mondal, P. (2023). Life cycle analysis of paver block production using waste plastics: Comparative assessment with concrete paver blocks. *Journal of Cleaner Production*, 402, 136857. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136857>

Gursel, A., Masanet, E., Horvath, A., y Stadel, A. (2014). Life-cycle inventory analysis of concrete production: A critical review. *Cement and Concrete Composites*, 51. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.03.005>

Hafez, H., Kurda, R., Cheung, W., y Nagaratnam, B. (2019). A Systematic Review of the Discrepancies in Life Cycle Assessments of Green Concrete. *Applied Sciences*, 9(22), 4803. <https://doi.org/10.3390/app9224803>

Henderson, A.D., Niblick, B., Golden, H.E. y Bare, J.C. (2021). Modeling spatially resolved characterization factors for eutrophication potential in life cycle assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 26, 1832–1846. <https://doi.org/10.1007/s11367-021-01956-4>

ICONTEC. (2021). NTC-ISO 14044:2021. Gestión Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Requisitos y Directrices. Requisitos Del Ciclo de Vida.

Industrial Conconcreto S.A.S. (2019). Declaración Ambiental de Producto ARENA, TRITURADO 1" Y 3/8".

Jamil, S., Shi, J., y Idrees, M. (2023). Effect of various parameters on carbonation treatment of recycled concrete aggregate using the design of experiment method. *Construction and Building Materials*, 382, 131339. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131339>

Jayasuriya, J., Basavaraj, A. S., Singh, S., y Gettu, R. (2023). Sustainability Assessment of Concrete Pavements with Recycled Concrete Aggregate. In J. I. Escalante-García, P. Castro Borges, y A. Duran-Herrera (Eds.), *Proceedings of the 75th RILEM Annual Week 2021* (pp. 363–371). Springer International Publishing.

Kim, A., Cunningham, P., Kamau-Devers, K., y Miller, S. (2022). OpenConcrete: a tool for estimating the environmental impacts from concrete production. *Environmental*

Research: *Infrastructure and Sustainability*, 2(4). <https://doi.org/10.1088/2634-4505/ac8a6d>

Kneifel, J., Lavappa, P., Polidoro, B., y Greig, A. L. (2019). Building for Environmental and Economic Sustainability (BEES) Online 2.1 technical manual. <https://doi.org/10.6028/NIST.TN.2032r>.

Koskela, L., Ferrantelli, A., Niiranen, J., Pikas, E., y Dave, B. (2019). Epistemological Explanation of Lean Construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 145(2). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0001597](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0001597)

Liu, B., Martre, P., Ewert, F., Webber, H., Waha, K., Thorburn, P., Ruane, A., Aggarwal, P. K., Ahmed, M., Balkovič, J., Basso, B., Biernath, C., Bindi, M., Cammarano, D., Cao, W., Challinor, A., De Sanctis, G., Dumont, B., Espadafor, M., y Pakistan, R. (2023). AgMIP-Wheat multi-model simulations on climate change impact and adaptation for global wheat. *Open Data Journal for Agricultural Research*, 9, 10-25. <https://doi.org/10.18174/odjar.v9i0.18092>

Liu, Z., Niu, Y., Guo, C., y Jia, S. (2023). A Vehicle Routing Optimization Model for Community Group Buying Considering Carbon Emissions and Total Distribution Costs. *Energies*, 16(2). <https://doi.org/10.3390/en16020931>

Martinsone, B., Di Sano, S., D'Elia, P., y Salle-Finley, T. (2023). A Conceptual Framework for Sustainable Promotion of a Positive School Climate: Context, Challenges, and Solutions. *Journal of Teacher Education for Sustainability*, 25, 64-85. <https://doi.org/10.2478/jtes-2023-0005>

Mocová, K. A., Sackey, L. N. A., y Renkerová, P. (2019). Environmental Impact of Concrete and Concrete-Based Construction Waste Leachates. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 290(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/290/1/012023>

Oladazimi, A., Mansour, S., y Hosseinijou, seyed abbas. (2020). Comparative Life Cycle Assessment of Steel and Concrete Construction Frames: A Case Study of Two Residential Buildings in Iran. *Buildings*, 10, 54. <https://doi.org/10.3390/buildings10030054>

Olsson, J. A., Miller, S. A., y Kneifel, J. D. (2024). A review of current practice for life cycle assessment of cement and concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 206, 107619. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107619>

Pérez, O., Pino, J., Dios, M., y Ciro, S. (2022). Factores de emisión de concretos modificados con residuos de vidrio en reemplazo de los agregados finos. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 30(2), 368-377. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052022000200368>

Portland Cement Association. (2014). Declaración Ambiental de Producto Cementos adicionados (según ASTM C595, ASTM C1157, AASHTOM240, o CSA A3001). www.astm.org

Poudyal, L., y Adhikari, K. (2021). Environmental sustainability in cement industry: An integrated approach for green and economical cement production. *Resources, Environment and Sustainability*, 4, 100024. <https://doi.org/10.1016/j.resenv.2021.100024>

Restrepo, A., Jaramillo, Y., y Ochoa, J. (2020). DISMECON.

Siamardi, K., Shabani, S., y Mansourian, A. (2023). Optimization of concrete mixes using mixture approach for slip-formed concrete pavement incorporating blends of limestone aggregates. *Construction and Building Materials*, 397, 132377. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132377>

SIATA. (2016). ¿Qué está pasando hoy? Calidad del aire. Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá. https://Siata.Gov.Co/Sitio_web/Index.Php/Noticia12

Speck, R., Selke, S., Auras, R., y Fitzsimmons, J. (2016). Life Cycle Assessment Software: Selection Can Impact Results. *Journal of Industrial Ecology*, 20(1), 18-28. <https://doi.org/10.1111/jiec.12245>

Stegmann, P., Londo, M., y Junginger, M. (2020). The Circular Bioeconomy: Its elements and role in European bioeconomy clusters. *Resources, Conservation & Recycling: X*, 6, 100029. <https://doi.org/10.1016/j.rcrx.2019.100029>

THE INTERNATIONAL EPD SYSTEM. (2 de febrero de 2024). <https://environdec.com/library>

UNE-EN 15804:2012+A2:2020. Sustainability in construction. Environmental product declarations. Basic product category rules for construction products. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0063508>

Uthaman, S., y Vishwakarma, V. (2023). Assessment of causes and consequences of concrete deterioration and its remediation. *Journal of Building Engineering*, 79, 107790. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107790>

Vázquez-Calle, K., Guillén-Mena, V., y Quesada-Molina, F. (2022). Analysis of the Embodied Energy and CO2 Emissions of Ready-Mixed Concrete: A Case Study in Cuenca, Ecuador. *Materials*, 15, 4896. <https://doi.org/10.3390/ma15144896>

Watari, T., Hata, S., Nakajima, K., y Nansai, K. (2023). Limited quantity and quality of steel supply in a zero-emission future. *Nature Sustainability*, 6(3), 336-343. <https://doi.org/10.1038/s41893-022-01025-0>

WEF. (2020). The Global Risks Report 2020. www.weforum.org

Youssif, O., Roychand, R., Elchalakani, M., y Tahwia, A. M. (2024). Assessment of the Efficiency of Eco-Friendly Lightweight Concrete as Simulated Repair Material in Concrete Joints. *Buildings*, 14(1). <https://doi.org/10.3390/buildings14010037>

Zandifaez, P., Asadi Shamsabadi, E., Nezhad, A., Zhou, H., y Dias-da-Costa, D. (2023). AI-Assisted optimisation of green concrete mixes incorporating recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 391, 131851. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131851>