

Inclusión de concretos sostenibles en el cumplimiento de la Resolución 0472 de 2017 y la disminución de emisiones del sector constructor colombiano: Análisis de materiales

Inclusion of sustainable concretes in compliance with Resolution 0472 of 2017 and the decrease in emissions from the Colombian building sector: Analysis of Materials

Inclusão de betões sustentáveis em conformidade com a Resolução 0472 de 2017 e a redução das emissões no sector construtor colombiano: Análise de materiais

Nicolás Steven Pardo Álvarez ^{a,*} | Deisy Jackeline López Castaño ^b
| María Alejandra Rico Pérez ^c

^a <https://orcid.org/0000-0002-9217-1952> Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, Medellín, Colombia

^b <https://orcid.org/0000-0001-5960-6304> Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, Medellín, Colombia

^c <https://orcid.org/0000-0002-9376-1874> Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, Medellín, Colombia

- Fecha de recepción: 2021-10-21
- Fecha concepto de evaluación: 2021-11-03
- Fecha de aprobación: 2021-11-09
<https://doi.org/10.22335/rct.v14i1.1510>

Para citar este artículo / To reference this article / Para citar este artigo: Pardo-Álvarez, N. S., López-Castaño, D. J. & Rico-Pérez, M. A. (2021). Inclusión de concretos sostenibles en el cumplimiento de la Resolución 0472 de 2017 y la disminución de emisiones del sector constructor colombiano. *Revista Logos Ciencia & Tecnología*, 14(1), 76-85. <https://doi.org/10.22335/rct.v14i1.1510>

RESUMEN

Actualmente se reconoce que el sector constructor es uno de los principales generadores de residuos de construcción y demolición (RCD) y emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a nivel mundial. Si bien a nivel nacional existe la Resolución 0472 de 2017 para llevar a cabo una adecuada gestión de los RCD, es importante analizar la influencia del cumplimiento de esta norma en la generación y posible disminución de GEI. Por esta razón, la presente investigación tiene como objetivo valorar técnicamente la relación entre el componente normativo de gestión de RCD (Resolución 472 de 2017) y la reducción de la huella de carbono en la primera fase del ciclo constructivo, estableciendo como estudio de caso una edificación en altura ubicada en la ciudad de Medellín. Para esto se plantearon cuatro escenarios de cumplimiento de Programa de Manejo Ambiental (PMA) en función de diferentes diseños de mezcla de concreto de 24 MPa de resistencia a la compresión, evaluando además la huella de carbono de cada escenario. Los diseños de mezcla de concreto presentaron la inclusión de aditivos superplastificantes, sustituciones parciales de cemento por ceniza volante y/o sustituciones parciales de agregados vírgenes por agregados reciclados. Los resultados demostraron que para el cumplimiento de la normativa de RCD es estratégica la sustitución parcial de agregados vírgenes por agregados reciclados (escenario 3), pero para la reducción en la huella de carbono es importante la sustitución parcial de cemento por ceniza volante, incluyendo aditivos superplastificantes (escenario 2). Por lo

tanto, el escenario 4 que vincula todas las estrategias mencionadas presenta altos porcentajes de cumplimiento de la normativa (17,2 % frente a 11,3% del escenario base) y una reducción en la huella de carbono (338,1 kg CO₂/m² frente a 438,1 kg CO₂/m² del escenario base).

Palabras claves: Residuos de construcción y demolición (RCD), concreto sostenible, huella de carbono, construcción sostenible, ciclo de vida constructivo, gases de efecto invernadero (GEI)

ABSTRACT

It is now recognized that the construction sector is one of the main generators of construction and demolition waste (CDW) and emissions of greenhouse gases (GHG) emission worldwide. Although at national level there is Resolution 0472 of 2017 to carry out proper management of the CDW, it is important to analyze the influence of compliance with this standard in the generation and possible reduction of (GHG). For this reason, the present research aims to technically assess the relationship between policy management component CDW (Resolution 472, 2017) and reducing the carbon footprint in the first phase of the construction cycle, establishing a case study a high-rise building located in the city of Medellín. For this purpose, four scenarios of compliance with the Environmental Management Program (EMP) were proposed, based on different concrete mix designs of 24 MPa of compressive strength, also evaluating the carbon footprint of each scenario. Concrete mix designs presented the inclusion of superplasticizer additives, partial substitutions of cement for fly ash and / or partial substitutions of virgin aggregates for recycled aggregates. The results showed that in order to comply with the CDW regulations, the partial replacement of virgin aggregates with recycled aggregates is strategic (scenario 3), but for the reduction in the carbon footprint, the partial replacement of cement with fly ash, including superplasticizer admixtures, is important (scenario 2). Therefore, the stage 4 which links all the above strategies has high percentages of compliance with regulations (17.2% versus 11.3% of the baseline scenario) and a reduction in carbon footprint (338.1 kg CO₂/m² versus 438.1 kg CO₂/m² of the baseline scenario).

Keywords: Construction and demolition waste (CDW), sustainable concrete, carbon footprint, sustainable construction, constructive life cycle, greenhouse gases (GHG)

RESUMO

É actualmente reconhecido que o sector da construção é um dos principais geradores de resíduos de construção e demolição (RCD) e de emissões de gases de efeito estufa (GEE) em todo o mundo. Embora a Resolução 0472 de 2017 exista a nível nacional para levar a cabo uma gestão adequada dos RCD, é importante analisar a influência do cumprimento desta regulamentação na geração e possível redução dos GEE. Por esta razão, esta investigação visa avaliar tecnicamente a relação entre a componente normativa da gestão de RCD (Resolução 472 de 2017) e a redução da pegada de carbono na primeira fase do ciclo de construção, estabelecendo como estudo de caso uma edificação em altura localizada na cidade de Medellín. Para este efeito, foram propostos quatro cenários de conformidade com o Programa de Gestão Ambiental (PGA) com base em diferentes projectos de misturas de betão de 24 MPa de resistência à compressão, avaliando além a pegada de carbono de cada cenário. Os desenhos da mistura de betão apresentavam a inclusão de aditivos superplástificantes, substituições parciais de cimento com cinza volante e/ou substituições parciais de agregados virgens por agregados reciclados. Os resultados mostraram que para o cumprimento da normativa de RCD é estratégica a substituição parcial de agregados virgens por agregados reciclados (cenário 3), mas para a redução na pegada de carbono é importante a substituição parcial de cimento por cinza volante, incluindo aditivos superplástificantes (cenário 2). Por conseguinte, o cenário 4, que liga todas as estratégias acima mencionadas, apresenta taxas de cumprimento elevadas (17,2% contra 11,3% no cenário de base) e uma redução da pegada de carbono (338,1 kg de CO₂ /m² contra 438,1 kg de CO₂/m² no cenário de base).

Palavras-chave: Resíduos de construção e demolição (RCD), betão sustentável, pegada de carbono, construção sustentável, ciclo de vida da construção, gases de efeito estufa (GEE)

Los residuos de construcción y demolición (RCD) se refieren a cualquier residuo que se genere en una obra, producto de cualquier proyecto que incluya una actividad de construcción y demolición. Para Colombia, es el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible el encargado de regular la gestión de los RCD, normalizada a través de la Resolución 0472 del 2017 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017), la cual establece el desarrollo de un programa de manejo ambiental (PMA) para construcciones con áreas de intervención iguales o superiores a 2000 m². Este PMA consiste principalmente en acciones de prevención y reducción, recolección y transporte, almacenamiento, aprovechamiento y disposición final de residuos, haciendo énfasis en la clasificación de los RCD en Tipo 1.1 (Productos de excavación y sobrantes de la adecuación de terreno), Tipo 1.2 (Productos de cimentaciones y pilotajes), Tipo 1.3 (Pétreos) y Tipo 1.4 (No pétreos). Entre los lineamientos específicos del PMA resalta que a partir del 1 de enero de 2018 se debe incorporar el 2 % del peso total de los materiales con RCD aprovechables y cada año se incrementa un 2 % hasta alcanzar el 30 %. En la tabla 1 se presenta la meta correspondiente a cada año. Estas pueden lograrse a partir de materiales de construcción utilizados en la obra fabricados a partir de RCD (certificado por el fabricante), RCD aprovechados en la obra y/o RCD entregados a una planta de aprovechamiento. El reporte del PMA se lleva a cabo 30 días antes del comienzo de actividades de obra, de acuerdo a los RCD proyectados a generar, y 45 días después de finalizadas las actividades de construcción, de acuerdo a los RCD generados (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

Tabla 1

Metas de aprovechamiento de RCD (en %) por año

Año	%	Año	%	Año	%
2018	2	2023	12	2028	22
2019	4	2024	14	2029	24
2020	6	2025	16	2030	26
2021	8	2026	18	2031	28
2022	10	2027	20	2032	30

Nota. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2017).

Por otra parte, en la actualidad se reconoce que el aumento en la cantidad de gases de efecto invernadero (GEI) se debe principalmente a actividades antropogénicas, como la quema de combustibles fósiles, la deforestación y los procesos industriales, entre los cuales encontramos el sector de la construcción, considerado a nivel mundial

como una de las industrias más importantes y asimismo una de las más contaminantes. Algunos estudios establecen que el ciclo de vida constructivo es responsable del 40%-50% de GEI a nivel mundial (Abd Rashid & Yusoff, 2015), lo que determina que el sector sea relevante para el cumplimiento de las aspiraciones globales de mitigación del cambio climático. El Acuerdo de París sobre el Cambio Climático (COP21), reafirmado durante las cumbres posteriores COP22 a COP26, insta un compromiso frente a la disminución de la cantidad de GEI en todos los sectores productivos. En este acuerdo, Colombia se comprometió a la disminución de sus emisiones de GEI en un 20% con respecto a las emisiones proyectadas para el año 2030 (García Arbeláez et al., 2016). Sin embargo, en el año 2020, el Gobierno incrementó su compromiso de reducción de emisiones al 51% (Gobierno de Colombia, 2020), a pesar de no establecer metas sectoriales. Para lograr esta reducción la industria de la construcción resulta estratégica, ya que se relaciona con los sectores de transporte, energía, residuos, industrias manufactureras y procesos industriales.

La cuantificación de emisiones en cualquier sector económico se lleva a cabo mediante el concepto de huella de carbono (HC), que mide la totalidad de GEI emitidos por efecto directo o indirecto de un individuo, organización, evento o producto. En el sector constructor se pueden encontrar diversas investigaciones relacionadas al cálculo de la HC de diferentes etapas del ciclo de vida constructivo (Área Metropolitana del Valle de Aburrá et al., 2018; Cho & Chae, 2016; Pardo et al., 2017; Seo et al., 2016; Sinha et al., 2016; Wu et al., 2017). De manera específica, para la etapa de materiales, el uso del cemento convencional en la actividad constructiva representa una fuerte problemática medioambiental, ya que genera el 7% del total de emisiones de CO₂ en todo el mundo (Hasanbeigi, 2021). Por lo tanto, una de las principales estrategias para reducir la huella de carbono de la construcción es disminuir el consumo de cemento a través del uso de aditivos (plastificantes o superplastificantes) y sustituciones parciales con cementantes suplementarios (cenizas volantes, escorias de fundición de alto horno, etc.), teniendo en cuenta que las emisiones asociadas a la fabricación de aditivos son altas (Nazari & Sanjayan, 2017; Tam et al., 2016) pero su consumo es muy bajo (inferior al 2% en peso respecto al cemento), mientras que las emisiones asociadas a las cenizas volantes o escorias de fundición son muy bajas, por tratarse de residuos de otros procesos, comparadas respecto al cemento (Nazari & Sanjayan, 2017; Tam et al., 2016).

Por lo tanto, la incorporación de RCD como sustitución parcial de los agregados en el concreto resulta en una de las estrategias más interesantes para el cumplimiento de la Resolución 0472 de 2017. Sin embargo, debido a que las emisiones asociadas al procesamiento de los RCD son muy similares a las de los agregados naturales (Ecoinvent, 2013), es importante analizar la influencia de la incorporación de RCD como sustitutos parciales de los agregados y la incorporación de cementantes suplementarios como sustitutos parciales del cemento (en conjunto con aditivos plastificantes o superplastificantes), determinando las condiciones óptimas de incorporación, sin presentar afectaciones a las propiedades del concreto, en especial la resistencia a la compresión. Debido a lo anterior, en esta investigación se llevó a cabo la valoración técnica de la relación entre la Resolución 0472 de 2017 y la reducción de la huella de carbono en la primera fase del ciclo constructivo en una edificación en altura en Medellín, Colombia, a través de la sustitución parcial de agregados naturales por agregados reciclados generados a partir del procesamiento de RCD y la sustitución parcial de cemento por ceniza volante e inclusión de aditivo superplastificante en los concretos estructurales.

■ Metodología

Edificación analizada

Para el análisis se eligió una obra civil denominada Proyecto X, comprendida por una edificación en altura correspondiente a 23.007,46 m² construidos, ubicada en el municipio de Medellín, Antioquia. Las actividades de construcción comenzaron en el año 2019.

Programa de manejo ambiental

Los PMA se desenvuelven a través de diez pasos, establecidos en el siguiente orden: a) Datos del generador, b) Datos de la obra, c) Descripción de actividades específicas de prevención y reducción de generación de RCD, d) Proyección de RCD a generar, e) Descripción de las actividades de demolición selectiva (cuando aplique), f) Descripción de las actividades de almacenamiento temporal de RCD en obra, g) Descripción de las actividades de aprovechamiento de RCD en obra, h) Gestores de RCD, i) Implementación del PMA y j) Metas. Para efectos de la investigación, se desarrollan los numerales d, i y j, puesto que los restantes consignados en la normativa son de índole descriptiva y no representan ninguna variación en los cálculos posteriores. Es importante aclarar que estos PMA corresponden a proyecciones de cumplimiento (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

El desarrollo de los PMA se plantea desde cuatro escenarios posibles, tomando como punto de partida las cantidades de obra suministradas por la constructora del Proyecto X. Cada escenario consta del desarrollo de los numerales d, i y j, así:

- (d) Proyección de RCD a generar. Corresponde a la cantidad proyectada de generación de residuos, de acuerdo a los porcentajes de desperdicio planteados para cada material desde la información de la constructora.
- (i) Implementación del PMA. Se refiere a las formas de disposición que se darán a cada tipo de RCD, entre los cuales se encuentran los residuos que serán aprovechados en la obra, los entregados en punto limpio, los que serán llevados a una planta de aprovechamiento y los que se entregarán en un sitio de disposición final.
- (j) Metas. Corresponde a las opciones de aprovechamiento que se implementarán para cumplir con las metas anuales, entre las cuales se encuentra el uso de materiales de construcción que sean fabricados a partir de RCD, los que sean aprovechados en la obra y los que sean entregados a una planta de aprovechamiento.

Sin embargo, cada uno cuenta con cantidades de obra específicas, acordes con los cambios efectuados en el diseño de mezcla propuesto para cada escenario, con el propósito de identificar las variaciones en el PMA correspondientes a los consumos de materiales. Los PMA construidos bajo los siguientes escenarios establecen:

- Escenario 1. Mezcla de concreto básica, es decir, sin la incorporación de agregado reciclado, superplastificante o ceniza volante. Corresponde al escenario de referencia.
- Escenario 2. Mezcla de concreto modificada con la incorporación de 1,5% de superplastificante y una sustitución del 30% de cemento por ceniza volante tipo C.
- Escenario 3. Mezcla de concreto modificada con la sustitución del 20% de agregado virgen por agregado reciclado generado a partir de RCD, sin inclusiones de aditivos o adiciones.
- Escenario 4. Mezcla de concreto modificada con la incorporación de 1,5% de superplastificante, sustitución del 30% de cemento por ceniza volante tipo C y sustitución del 20% de agregado virgen por agregado reciclado generado a partir de RCD.

Como consideraciones adicionales, la constructora del Proyecto X plantea que los concretos utilizados en pilas,

losas, muros, columnas y vigas corresponden a una resistencia a la compresión necesaria de 24 MPa, y que los RCD 1.1 y 1.2 serán enviados a un sitio de disposición final, los RCD 1.3 serán aprovechados tanto en la obra como en una planta de aprovechamiento y el acero de los RCD 1.4 será entregado a una planta de aprovechamiento. Además, en función de los materiales consumidos, el acero incorpora 90% de material reciclado, el vidrio 11% y la cerámica cocida tradicional el 80%.

Huella de carbono para la etapa de materiales

Para el cálculo de la huella de carbono de la etapa de extracción de la materia prima y fabricación de materiales de obra (kg CO₂e/m²) se utilizó la norma NTC 14064-1 (ISO 14064-1, 2018). Para los factores de emisión se llevó a cabo una actualización de los consumos eléctricos del estudio de Salazar Jaramillo (2012), y se complementaron con una revisión bibliográfica. En la tabla 2 se presentan los factores de emisión (kg CO₂/kg) utilizados para cada material, con su respectiva fuente.

Tabla 2
Factores de emisión para materiales de construcción

Material	Factor de emisión (kg CO ₂ /kg)	Fuente
Cemento	0,8920	Promedio entre los reportes integrados para Argos (2019) y Cemex (2019) y el informe de Salazar, actualizado en función de los consumos eléctricos colombianos del año 2019 (UPME & SIEL, 2020)
Agua	0,0013	Valores de Salazar Jaramillo (2012), actualizados en función de los consumos eléctricos colombianos del año 2019 (UPME & SIEL, 2020)
Agregado grueso	0,0020	
Agregado fino	0,0080	
Agregado grueso reciclado	0,0080	
Ceniza volante	0,0150	Promedio entre Nazari y Sanjayan (2017) y Tam et al. (2016)
Aditivo	0,5110	
Acero largo	1,3220	Valor de Salazar Jaramillo (2012), ajustado en función del porcentaje de coproductos incorporados en aceros nacionales (ANDI, 2019) y la cantidad de acero largo importado durante 2019 (ANDI, 2020)
Vidrio	1,3280	Valores de Salazar Jaramillo (2012), actualizados en función de los consumos eléctricos colombianos del año 2019 (UPME & SIEL, 2020)
Yeso	0,1970	
Pintura	0,1530	
Cobre	5,7290	

Material	Factor de emisión (kg CO ₂ /kg)	Fuente
Cerámica cocida tradicional	0,2080	Valores de Salazar Jaramillo (2012), actualizados en función de los consumos eléctricos colombianos del año 2019 (UPME & SIEL, 2020)
Cerámica decorativa	0,7890	
Policloruro de vinilo	7,0600	Promedio entre el estudio de Ruuska (2013) y la bases de datos Ecoinvent (2013)
Aluminio	2,3000	
Polietileno de alta densidad	1,8600	
Poliuretano rígido	4,2600	

Resultados y discusión

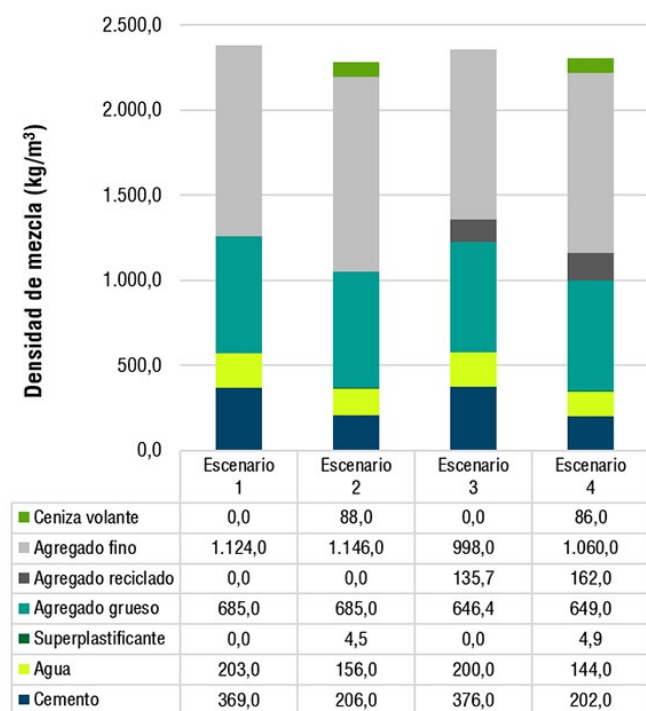
Escenarios del PMA

En la figura 1 se presentan los diseños de mezcla (kg/m³) planteados por escenario. Cada diseño fue planteado y validado para la resistencia a la compresión de los concretos estructurales del proyecto, correspondiente a 24 MPa. Se observan ligeras variaciones en la densidad final de las mezclas, atribuidos a las sustituciones mencionadas, resaltando que el diseño más denso es el del escenario 1 y el menos denso el del escenario 2. Para efectos de la investigación, el concreto planteado en el escenario 1 tiene la característica de que puede ser preparado *in situ*, pero los concretos planteados para los escenarios 2, 3 y 4 corresponden a concretos premezclados. Esto se debe en los escenarios 2 y 4 a la disponibilidad de ceniza volante y en el escenario 3 al cuidado que se debe prestar en la resistencia final a la compresión debido a la incorporación de RCD.

Una vez establecidas las densidades de cada escenario, se calcularon las cantidades de materiales totales, los indicadores y las metas por escenario. En la tabla 3 se presentan las cantidades de materiales pétreos y no pétreos por escenario. De acuerdo a las densidades finales de los concretos planteados se pueden observar también ligeras diferencias en las cantidades totales de materiales a consumir en cada escenario, resultando en que el escenario 1 es el que presenta mayor consumo de materiales y el escenario 2 es el de menor consumo.

En la tabla 4 se presentan las proyecciones de generación de RCD por escenario. Se puede observar que la proyección de generación de RCD tipo 1.1 y 1.2 es la misma para los cuatro escenarios, ya que la cantidad de tierras de excavación y productos de cimentaciones

Figura 1
Diseños de mezcla de concreto (kg/m³) por escenario



no varía. De igual manera sucede para los RCD tipo 1.4, ya que el volumen de concreto a utilizar es el mismo. Sin embargo, la proyección de los RCD tipo 1.3 para los escenarios 2, 3 y 4 son diferentes a los del escenario 1, debido a que el porcentaje de desperdicio asumido para el escenario 1 es del 4%, contrario al 0% asumido para los demás escenarios, por tratarse de concretos premezclados.

En la tabla 5 se presentan los indicadores por escenario. Se puede observar que para los RCD generados en la obra, el indicador en el escenario 1 es superior a los demás, debido a que el concreto preparado *in situ* mediante métodos tradicionales presenta un porcentaje de desperdicio superior a los concretos premezclados. Lo anterior conlleva a una afectación de los RCD recibidos en planta de aprovechamiento, debido a la necesidad de reciclar la cantidad de residuos pétreos asociados al concreto preparado en la obra del escenario 1. Para las metas, debido a que esto se calcula en función de la cantidad total de materiales, también se esperaba que los escenarios 1 y 2 fueran los de mayor y menor meta.

Tabla 3
Cantidades de materiales (t) pétreos y no pétreos por escenario

Categoría	Material	Escenarios			
		1	2	3	4
Pétreos	Concreto	37.904,11	36.383,81	37.507,72	36.740,40
	Mortero	2.849,5	2.849,5	2.849,5	2.849,5
	Cerámica cocida tradicional	2.069,1	2.069,1	2.069,1	2.069,1
	Cerámica decorativa y sanitaria	396,3	396,3	396,3	396,3
No pétreos	Acero en concreto	2.114,5	2.114,5	2.114,5	2.114,5
	Vidrio	14,2	14,2	14,2	14,2
	Otros	1.331,2	1.331,2	1.331,2	1.331,2
Total (t)		46.679,03	45.158,72	46.282,63	45.515,32

Tabla 4
Proyecciones de generación de RCD por escenario

Tipo de RCD	Escenarios (t/obra)			
	1	2	3	4
Tipo 1.1. Productos de excavación y sobrantes de la adecuación de terreno.	1.942,67	1.942,67	1.942,67	1.942,67
Tipo 1.2. Productos de cimentaciones y pilotajes: arcillas, bentonitas y demás.	4.562,95	4.562,57	4.562,57	4.562,57
Tipo 1.3. Pétreos.	1.671,77	155,61	155,61	155,61
Tipo 1.4. No pétreos.	69,20	69,20	69,20	69,20

Tabla 5
Indicadores por escenario

Material	Escenarios (t/obra)			
	1	2	3	4
Cantidad de materiales de construcción usados en la obra (t/obra)	46.679,03	45.158,72	46.282,63	45.515,32
Cantidad de RCD generado en la obra (t/obra)	8.246,59	6.730,04	6.730,04	6.730,04
Cantidad de RCD aprovechado en la obra (t/obra)	0,00	0,00	155,89	155,89
Cantidad de RCD recibido en punto limpio (t/obra)	0,00	0,00	0,00	0,00
Cantidad de RCD recibido en planta de aprovechamiento de RCD (t/obra)	1.714,35	198,18	42,29	42,29
Cantidad de RCD llevado a sitio de disposición final de RCD (t/obra)	6.532,24	6.531,86	6.531,86	6.531,86
Meta	2.800,74	2.709,52	2.776,96	2.730,92

Finalmente, en la tabla 6 se presentan las metas por escenario. Se puede observar que, en función del año de comienzo de actividades de construcción, todos los escenarios cumplen con lo dispuesto por la Resolución 0472 de 2017 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017), gracias a los aprovechamientos de RCD e incorporaciones de material reciclado en diferentes

materiales. Sin embargo, los escenarios 3 y 4 son de especial atención, ya que por la cantidad de RCD aprovechados estarían cumpliendo con metas planteadas para los años 2023 y 2025 respectivamente. La importancia de estos altos cumplimientos radica en la generación de una hoja de ruta que permita brindar alternativas, de cara a los porcentajes de cumplimiento planteados en la normativa.

Tabla 6
Metas por escenario

Opciones de aprovechamiento	Escenario 1		Escenario 2	
	Toneladas (t)	Porcentaje (%)	Toneladas (t)	Porcentaje (%)
Materiales de construcción utilizados en la obra, fabricados a partir de RCD (certificado por el fabricante)	3.559,91	7,63	4.873,37	10,96
RCD aprovechados en obra	0,00	0,00	0,00	0,00
RCD entregados a una planta de aprovechamiento	1.714,35	3,67	198,18	0,44
Total (t)	5.274,26	11,30	5.071,55	11,40
Correspondencia año de cumplimiento	2022		2022	
Opciones de aprovechamiento	Escenario 3		Escenario 4	
	Toneladas (t)	Porcentaje (%)	Toneladas (t)	Porcentaje (%)
Materiales de construcción utilizados en la obra, fabricados a partir de RCD (certificado por el fabricante)	5.922,90	12,80	7.634,90	16,77
RCD Aprovechados en Obra	155,89	0,34	155,89	0,34
RCD entregados a una planta de aprovechamiento	42,29	0,09	42,29	0,09
Total (t)	6.121,08	13,23	7.833,08	17,21
Correspondencia año de cumplimiento	2023		2025	

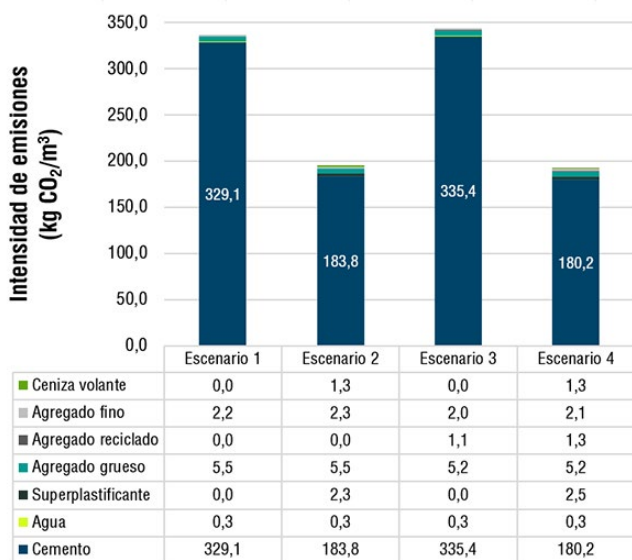
Huella de carbono para la etapa de materiales por escenario

En la figura 2 se muestra la intensidad de emisiones (kg CO₂/m³) de los materiales para los diseños de mezcla planteados por escenario. Como se observa, el cemen-

to es el material que mayor generación de emisiones presenta en todos los escenarios, asociado tanto a su elevado factor de emisión como a su elevada intensidad material. Debido a esta razón, los diseños de mezcla de concreto de los escenarios 2 y 4, en los cuales se llevó

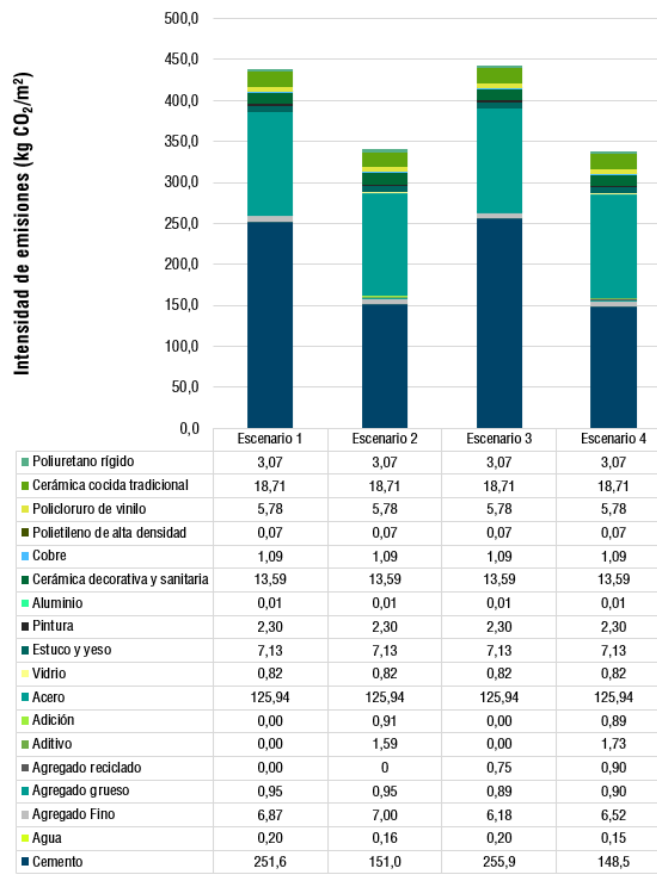
a cabo inclusión de superplastificante y sustitución parcial de cemento por ceniza volante, son los escenarios de menor huella de carbono por metro cúbico. Como se presenta en el escenario 3, la sustitución parcial de agregados vírgenes por agregados reciclados no representa una disminución en la huella de carbono, debido a que las emisiones asociadas al procesamiento de RCD para generar nuevos agregados son muy similares a las necesarias para procesar agregados vírgenes. No obstante, el escenario 3 no debe ser descartado en su totalidad, ya que, si se analiza desde el punto de vista del agotamiento de recursos naturales y el respectivo impacto de su explotación, siempre será más conveniente usar agregados reciclados, como se observa con la similitud en la huella de carbono de los escenarios 1 y 3.

Figura 2
Intensidad de emisiones (kg CO₂/m³) para los diseños de mezcla de concreto por escenario



En la figura 3 se presenta la intensidad de emisiones (kg CO₂/m²) de los materiales reportados por la constructora. Se observa que el cemento y el acero son los materiales de mayor impacto ambiental, asociado tanto a sus elevados factores de emisión como a su intensidad material. De acuerdo a lo observado en los diseños de mezcla, los escenarios 2 y 4 son los escenarios de menor huella de carbono, y el escenario 3 no presenta una disminución en el impacto ambiental de la edificación. Se resalta el hecho de que la huella de carbono de los cuatro escenarios se mueve en un rango entre 338,1 y 442,4 kg CO₂/m², consistente con investigaciones realizadas para el país para sistemas constructivos similares (Área Metropolitana del Valle de Aburrá et al., 2018).

Figura 3
Intensidad de emisiones (kg CO₂/m²) para los materiales reportados por escenario

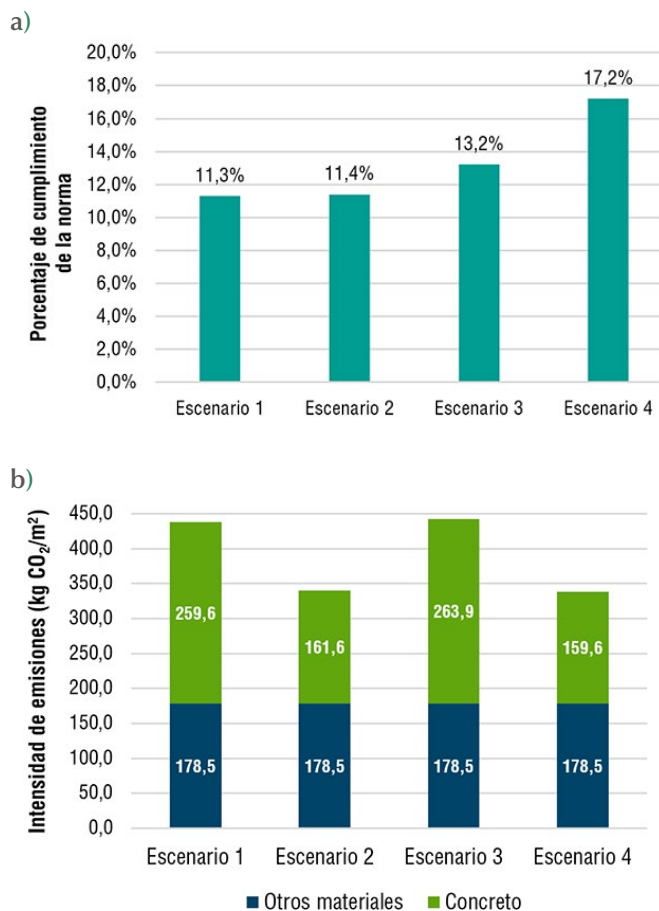


Relación entre el cumplimiento de la Resolución 0472 de 2017 y la huella de carbono para etapa de materiales por escenario

En la figura 4a se muestra el porcentaje de cumplimiento de la Resolución 0472 de 2017 y en la figura 4b se muestra la intensidad de emisiones (kg CO₂/m²) discriminada para el concreto y los demás materiales reportados para cada escenario. En función del cumplimiento de la normativa, como se mencionó, los escenarios 3 y 4 son los que presentan mayor porcentaje, debido a que realizan sustituciones parciales de cemento por ceniza volante y sustituciones parciales de agregado virgen por agregado reciclado. Sin embargo, en función de la huella de carbono en la etapa de materiales son los escenarios 2 y 4 los que presentan menor cantidad de emisiones por metro cuadrado, ya que además de las sustituciones mencionadas, incluyen aditivo superplastificante, que al funcionar como agente reductor de agua y manteniendo la relación agua/cemento constante, complementa la reducción de cemento en los concretos planteados (Sika, 2017).

Figura 4

Para cada escenario: a) Porcentaje de cumplimiento de la Resolución 0472 de 2017; b) Intensidad de emisiones (kg CO₂/m²) para el concreto y los demás materiales reportados



Conclusiones

- La Resolución 0472 de 2017 se presenta como una normativa para el aprovechamiento de RCD en las edificaciones. Sin embargo, en el marco de los compromisos mundiales de reducción de emisiones de GEI, para el sector constructor colombiano no solo resulta estratégico el aprovechamiento de los RCD, sino también el reemplazo parcial de cemento por otro tipo de materiales, como las cenizas volantes, que por su tipología de material reciclado contribuyen al cumplimiento de la normativa y a su vez a la reducción de la huella de carbono. Como se mostró en el escenario 4, una reducción en la cantidad de cemento de 148,9 kg/m³, incorporando 86 kg/m³ de ceniza volante y 4,9 kg/m³ de superplastificante, respecto al escenario de concretos convencionales, representa una reducción de 144,3 kg CO₂/m³ para todo el diseño de mezcla.

- Si bien los porcentajes de cumplimiento parecen difíciles de lograr, la implementación en las obras de sustituciones parciales de agregados vírgenes por agregados reciclados y la sustitución parcial de cemento por cementantes suplementarios como las cenizas volantes, complementado con la inclusión de aditivos superplastificantes, demuestra que las metas planteadas por el Ministerio de Ambiente pueden ser cumplidas, incluyendo a su vez una reducción en la huella de carbono. Como fue observado en el escenario 4, una sustitución del 20% de agregado virgen por agregado reciclado generado a partir de RCD y del 30% de cemento por ceniza volante tipo C, complementada con la inclusión de 1,5% de aditivo superplastificante, puede lograr porcentajes de cumplimiento por encima del 17% y reducciones cercanas a los 100 kg CO₂/m² respecto al escenario de concretos convencionales.
- Si bien el estudio muestra resultados muy interesantes en cuanto a disminución de emisiones, las cementeras como Cemex con su concreto *Vertua* o Argos con su *Cemento Verde* están apostando por la implementación de concretos bajos en emisiones, lo cual puede representar una reducción aún mayor en la huella de carbono de las edificaciones. Si además estos concretos incluyen algún tipo de material reciclado, se facilitará el cumplimiento de las metas de la Resolución 0472 de 2017.
- Los futuros trabajos que se desprenden de la presente investigación pueden estar asociados al uso de los concretos mencionados, bajos en emisiones, o al análisis del transporte de los materiales. De manera particular para el transporte, y tomando la ceniza volante como ejemplo, debido a que la mayor disponibilidad de este material se encuentra en las termoeléctricas, se incrementarían las distancias y por ende las emisiones.

Referencias

- Abd Rashid, A. F., & Yusoff, S. (2015). A review of life cycle assessment method for building industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 244-248. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.043>
- ANDI (2019). *El sector siderúrgico es un claro ejemplo de economía circular*. <http://www.andi.com.co/Home/Noticia/15640-el-sector-siderurgico-es-un-claro-ejemp>
- ANDI (2020). *Producción mensual acero crudo y largos a noviembre 2019 con importaciones a septiembre*

2019. [http://www.andi.com.co/Uploads/6 Produccion mensual acero crudo y largos a Noviembre 2019 con importaciones a Septiembre 2019.pdf](http://www.andi.com.co/Uploads/6%20Produccion%20mensual%20acero%20crudo%20y%20largos%20a%20Noviembre%202019%20con%20importaciones%20a%20Septiembre%202019.pdf)
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Camacol Antioquia & One Planet build with care - UNEP. (2018). *Implementación de la Política Pública de Construcción Sostenible*. https://www.metropol.gov.co/SiteAssets/Paginas/Noticias/conoce-mas-sobre-la-politica-publica-de-construccion-sostenible-del-valle-de-aburra/Implementación_Política_Pública_Construcción_Sostenible_Valle_de_Aburrá_2019.pdf
- Argos (2019). *Integrated Report*. <https://www.grupoargos.com/en-us/sustainability/integrated-report>
- Cemex (2019). *Integrated Report*. <https://www.cemex.com/investors/reports/home#navigate>
- Cho, S. H., & Chae, C. U. (2016). A study on life cycle CO₂ emissions of low-carbon building in South Korea. *Sustainability (Switzerland)*, 8(6), 1-19. <https://doi.org/10.3390/su8060579>
- Ecoinvent (2013). *Bases de datos versión 3.01*. <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/>
- García Arbeláez, C., Vallejo López, G., Higgins, M. L., & Escobar, E. M. (2016). *El Acuerdo de París. Así actuará Colombia frente al cambio climático*. WWF-Colombia.
- Gobierno de Colombia (2020). *Actualización de la Contribución Determinada a Nivel Nacional de Colombia (NDC)*. <https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/ColombiaFirst/NDCactualizadadeColombia.pdf>
- Hasanbeigi, A. (2021). *Global Cement Industry's GHG Emissions*. Global Efficiency Intelligence. <https://www.globalefficiencyintel.com/new-blog/2021/global-cement-industry-ghg-emissions>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2017). *Resolución 0472 de 2017, por la cual se reglamenta la gestión integral de los residuos generados en las actividades de construcción y demolición (RCD) y se dictan otras disposiciones*. DO. 50166.
- Nazari, A., & Sanjayan, J. G. (2017). *Handbook of Low Carbon Concrete*. Elsevier.
- Pardo, N., Penagos, G., González, A., & Botero, A. (2017). Calculation of greenhouse gases in the construction sector in the Aburrá Valley, Colombia. *Proceedings of 33rd PLEA International Conference: Design to Thrive, PLEA 2017*, 1, 932-939.
- Ruuska, A. (2013). *Carbon Footprint for Building Products. ECO2 data for materials and products with the focus on wooden building products*. (A. Ruuska, Ed.), VTT Technology 115. VTT Technical Research Centre of Finland. <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/technology/2013/T115.pdf>
- Salazar Jaramillo, A. (2012). *Determinación de propiedades físicas y estimación del consumo energético en la producción, de acero, concreto, vidrio, ladrillo y otros materiales, entre ellos los alternativos y otros de uso no tradicional, utilizados en la construcción de edificaciones*. UPME-PNUD. <http://www.si3ea.gov.co/LinkClick.aspx?fileticket=6G1VGDdWfHc%3D&tabid=90&>
- Seo, M. S., Kim, T., Hong, G., & Kim, H. (2016). On-site measurements of CO₂ emissions during the construction phase of a building complex. *Energies*, 9(8), 1-13. <https://doi.org/10.3390/en9080599>
- Sika. (2017). *Sikartilla. Aditivos para cemento, mortero y concreto*. <https://col.sika.com/dms/getdocument.get/f1bbf8b6-750c-38dd-b4c5-9b1852e7eed9/Sikartilla%20de%20aditivos%202017%20.pdf>
- Sinha, R., Lennartsson, M., & Frostell, B. (2016). Environmental footprint assessment of building structures: A comparative study. *Building and Environment*, 104, 162-171. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.05.012>
- Tam, V. W. Y., Le, K. N., & Shen, L. (2016). *Life Cycle Assessment on Green Building Implementation*. Shu-Kun Lin.
- UPME & SIEL. (2020). *Estadísticas y variables de generación*. <http://www.siel.gov.co/Inicio/Generación/Estadisticasyvariablesdegeneración/tabid/115/Default.aspx>
- Wu, X., Peng, B., & Lin, B. (2017). A Dynamic Life Cycle Carbon Emission Assessment on Green and Non-Green Buildings in China. *Energy and Buildings*, 149, 272-281. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.05.041>