

Impactos ambientales asociados a la huella de carbono y la energía incorporada del ciclo de vida de una edificación en Medellín

Environmental impacts associated with the carbon footprint and embodied energy of life cycle of a building in Medellín

Nicolás Steven Pardo ^(*), Guillermo León Penagos ^(**), Harlem Acevedo ^(***)

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es la implementación de un modelo que permita calcular la huella de carbono y la energía incorporada de una edificación. Para esto se hizo un análisis mediante el software UMBERTO NXT CO₂ de las fases 1 y 2 del ciclo de vida de la edificación, como se describe a continuación: Fase 1, materiales e insumos y Fase 2, construcción. Las emisiones de la Fase 3, derivadas de la operación de edificaciones, y Fase 4, final de ciclo de vida, no forman parte del alcance del presente estudio. Se encontró que las etapas de extracción de la materia prima y la fabricación de materiales en la Fase 1 generan más del 93% de la huella de carbono y más del 87% para la energía incorporada. Las demás fases no presentaron porcentajes significativos en estos dos indicadores.

Palabras clave: huella de carbono; energía incorporada; gases de efecto invernadero (GEI); CO₂ equivalente; ciclo de vida de la edificación; UMBERTO NXT CO₂.

ABSTRACT

The aim of this paper is to present an analysis model built in order to calculate the carbon footprint and embodied energy of a building. For this purpose, an analysis was made by using the Umberto NXT CO₂ software for phases 1 and 2 of the life cycle of the building. Phase 1, materials and supplies and Phase 2, construction. Emissions of Phase 3, derived from the buildings operations, and Phase 4, end of life cycle, are not part of the scope of this study. In conclusion, extraction of raw material and manufacture of building materials stages in Phase 1 were found to generate more than 93% of the carbon footprint and more than 87% for embodied energy. The other stages did not present significant percentages in these two indicators.

Keywords: carbon footprint; embodied energy; greenhouse gases (GHG); CO₂ equivalent; life cycle of the building; UMBERTO NXT CO₂.

(*) Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia. Medellín (Colombia).

(**) Universidad Politécnica de Cataluña. Cataluña (España).

(***) Instituto Tecnológico Metropolitano. Medellín (Colombia).

Persona de contacto/Corresponding author: nicolas.pardo.alvarez@gmail.com (N. S. Pardo)

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9217-1952> (N.S. Pardo); <https://orcid.org/0000-0002-1736-2142> (G.L. Penagos); <https://orcid.org/0000-0002-6574-855X> (H. Acevedo)

Cómo citar este artículo/Citation: Nicolás Steven Pardo, Guillermo León Penagos, Harlem Acevedo (2022). Impactos ambientales asociados a la huella de carbono y la energía incorporada del ciclo de vida de una edificación en Medellín. *Informes de la Construcción*, 74(565): e436. <https://doi.org/10.3989/ic.82758>

Copyright: © 2022 CSIC. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

Recibido/Received: 17/08/2020
Aceptado/Accepted: 20/07/2021
Publicado on-line/Published on-line: 25/03/2022

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad se reconoce que el cambio climático originado por las actividades humanas constituye uno de los mayores desafíos ambientales frente a las expectativas de tener un desarrollo sostenible (1). El acuerdo de París sobre el Cambio Climático (COP21) (2), reafirmado durante las cumbres posteriores COP22 a COP25, supone un compromiso frente a la disminución de la cantidad de gases de efecto invernadero (GEI) en todos los sectores productivos. Aunque el sector de la construcción es crucial para el desarrollo socioeconómico global, los impactos ambientales de sus procesos son cada vez más significativos. El ciclo de vida de la actividad constructiva consiste en cinco fases: 1) materiales e insumos, 2) construcción, 3) operación, 4) final del ciclo de vida, 5) planeación y diseño, donde se toman las decisiones que tendrán impacto sobre todas las demás fases.

Recientes estudios indican que el ciclo de vida de la construcción es responsable del 40-50% de las emisiones de GEI a nivel mundial (3), lo cual hace que este sector también resulte crucial para cumplir con las aspiraciones globales de mitigación del Cambio Climático. No obstante, este porcentaje está basado en datos de la actividad constructiva en países con climas estacionales y en economías desarrolladas, que no necesariamente son representativos para países tropicales con economías emergentes (4). El inventario nacional de emisiones de GEI asigna un 5% para las industrias manufactureras y de la construcción. Sin embargo, bajo un enfoque de ciclo de vida, la actividad constructiva se relaciona con otros sectores económicos, tales como el transporte, responsable del 10% de las emisiones nacionales, la industria energética, responsable del 9% de las emisiones, la disposición de residuos, responsable del 6% de las emisiones, los procesos industriales y las pérdidas de energía por transmisión, cada uno de los cuales es responsable de un 4% de las emisiones nacionales (5). Ante el compromiso de Colombia, frente al Acuerdo de París de disminuir en un 20% sus emisiones de GEI para el año 2030 (6), es necesario crear una línea base de emisiones sectoriales con el fin de establecer metas y estrategias específicas en materia de mitigación.

Para llevar a cabo la cuantificación de emisiones en cualquier sector económico, se introduce el concepto de huella de carbono, el cual mide la totalidad de GEI emitidos por efecto directo o indirecto de un individuo, organización, evento o producto. La implementación de la huella de carbono como herramienta metodológica de medición de impacto ambiental en el sector constructivo es relativamente reciente (7-13). Por otra parte, de manera paralela al cálculo de los GEI, es posible determinar los consumos energéticos para el ciclo de vida del sector constructor. La energía incorporada es la energía consumida por todos los procesos asociados con la producción de un edificio, desde la extracción y el procesamiento de recursos naturales hasta la fabricación, el transporte y la instalación de los materiales y productos. La energía incorporada no incluye la operación y disposición del material de construcción. Estas fases son consideradas bajo el enfoque de ciclo de vida de la huella de carbono (7-13).

El objetivo de este trabajo es la generación e implementación de un modelo para la cuantificación de emisiones de GEI y energía incorporada mediante la aplicación del software UMBERTO NXT CO₂ y la integración de protocolos internacionales, asociados a las fases 1 y 2 del ciclo de vida de una edificación en altura del Valle de Aburrá, región central y urbanizada de Antioquia, Colombia. Se plantearon las etapas de extracción y fabricación

de materiales, transporte de materiales a obra, la etapa constructiva y el transporte, y la disposición de Residuos de Construcción y Demolición (RCD), hasta antes del comienzo de operación de la edificación analizada.

2. METODOLOGÍA

Para el cálculo de la huella de carbono (kg CO₂ eq.), a nivel mundial se reconocen el protocolo PAS 2050 y el GHG Protocol y ambos se vinculan a las normas colombianas NTC-ISO 14040 y 14064-1 (14-16). Para este estudio se utilizó un método estándar que vincula los protocolos mencionados (17). Para la energía incorporada (MJ) se utilizaron el mismo modelo y las mismas variables. Las emisiones de GEI derivadas de la operación y final del ciclo de vida de edificaciones no forman parte del alcance del presente estudio; el estudio se concentra únicamente en las fases 1 y 2 del ciclo de vida de la edificación, como se describe a continuación.

Procesos correspondientes a la fase 1 del ciclo de vida.

- Extracción de materia prima.
- Fabricación de materiales de obra.
- Transporte de materiales a obra.

Procesos correspondientes a la fase 2 del ciclo de vida.

- Transportes internos.
- Uso de maquinarias y equipos.
- Instalaciones
- Transporte de RCD generados durante la etapa constructiva.
- Disposición/aprovechamiento de RCD generados durante la etapa constructiva.

A fin de facilitar la evaluación, las fases 1 y 2 de ciclo de vida con los procesos mencionados, se re-estructuraron en las siguientes etapas:

- a. Extracción de materia prima y fabricación de materiales de obra.
- b. Transporte de materiales a obra.
- c. Construcción.
- d. Transporte de RCD generados durante la etapa constructiva.
- e. Disposición/aprovechamiento de RCD generados durante la etapa constructiva.

Para la etapa de extracción de la materia prima y fabricación de materiales de obra, los factores de emisión fueron tomados del informe del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), la Unidad de Planeación Minero Energética de Colombia (UPME) y Ecoingeniería (12), y fueron actualizados al año 2017 mediante el uso del factor de emisión de energía eléctrica reportado por la UPME (18). Para los materiales importados, se utilizaron los factores de emisión de las bases de datos de Ecoinvent (19) y GaBi (20), tanto para los materiales como para el transporte oceánico hasta una frontera colombiana.

Para la etapa de transporte hasta la obra, se proponen dos modos de trabajo. El primero se refiere al uso de información de las bases de datos disponibles y el segundo se refiere a la aproximación del consumo de combustible de los vehículos transportadores de materiales y de RCD. Es importante tener en cuenta durante esta etapa que no sólo se relaciona el transporte de ida, sino también el transporte de regreso. También se debe tener en cuenta el transporte desde el lugar de fabricación hasta el centro

de distribución y desde ese lugar hasta la edificación. Primera metodología: A nivel internacional, para el transporte de carga, se utilizan factores de emisión en kg CO₂/t*km o consumos energéticos en MJ/ t*km. De nuevo estos factores se pueden utilizar a partir de las bases de datos de Ecoinvent o GaBi (19, 20); sin embargo, las condiciones topográficas a nivel nacional se desestiman en el uso de este tipo de factores de emisión internacionales. Segunda metodología: Consumo de combustible durante el trayecto. En este caso, solo se tienen en cuenta las emisiones directas, utilizando los factores de emisión presentados en el informe de la Federación Colombiana de Combustibles (FECOC) (21). Una vez estimado el consumo de combustible, se puede multiplicar por el factor de emisión y de esa manera obtener las emisiones y la energía incorporada.

Durante la etapa constructiva se tienen en cuenta, de nuevo, los factores de emisión asociados al consumo de combustible. En esta fase en particular, se toma el consumo de combustible por parte de las diferentes máquinas que trabajan in situ (mezcladoras portátiles, vibradoras y bombeadoras de concreto principalmente). También se introduce un factor de emisión nuevo, en relación a las máquinas que trabajan in situ pero funcionan con electricidad, y en general para el consumo eléctrico de la obra. En este caso el factor de emisión corresponde al promedio durante el tiempo de ejecución del proyecto, reportado por la UPME (18).

La etapa de transporte de RCD generados durante la etapa constructiva, se trabaja de manera idéntica a la etapa de transporte de materiales a obra. Finalmente, para la fase de disposición y aprovechamiento de RCD, a partir de las bases de datos de Ecoinvent se utilizaron actividades asociadas a las principales disposiciones de residuos, utilizando como procesos generales el aprovechamiento en un centro especializado, el aprovechamiento por terceros, la disposición en escombrera, la disposición en relleno sanitario y la disposición de residuos peligrosos.

La empresa constructora de la edificación analizada, llamada Constructora X, proporcionó la información necesaria asociada principalmente al lugar de procedencia de los materiales, su consumo, la cantidad de tierras de excavación removidas, el consumo eléctrico general de la obra, las cantidades de RCD por diferente tipo y el lugar de disposición final. De manera específica, los consumos de combustible asociados al transporte de materiales y RCD se calcularon a partir de un análisis estadístico bayesiano propuesto en la metodología.

2.1. Proyecto analizado

El proyecto analizado, denominado Proyecto X, corresponde a una edificación de vivienda multifamiliar en altura, construido bajo un sistema mixto de columnas y muros estructurales. El proyecto cuenta con 9.568,67 m² construidos, distribuidos en 22 pisos y la zona de parqueaderos. El consumo de agua fue de 3.198 m³ y la duración de construcción fue de 19 meses, con fecha de inicio noviembre de 2017. En este proyecto todos los concretos estructurales, ya sean preparados en obra o premezclados, fueron diseñados para 21 MPa de resistencia a la compresión.

2.2. Modelo para el cálculo de emisiones

Para el cálculo de las emisiones se utilizó el software UMBERTO NXT CO₂ de la empresa Ifu Hamburg (17), para el cual se diseñó un mapa de procesos con un modelo con 302 variables,

en el cual se utilizó sólo un flujo de referencia y un flujo manual. En la Figura 1 se muestra el modelo utilizado. Los cuadros azules corresponden a los diferentes procesos del sistema, los círculos verdes a entradas a los procesos y los círculos rojos a salidas. De izquierda a derecha las etapas analizadas fueron:

- Extracción de materia prima y fabricación de materiales de obra, en franja verde.
- Transporte de materiales a obra, en franja amarilla.
- Construcción, en franja azul.
- Transporte de RCD generados durante la etapa constructiva, en franja roja.
- Disposición/aprovechamiento de RCD generados durante la etapa constructiva, en franja violeta.

La descripción del modelo se muestra en la Tabla 1.

La codificación utilizada para cada uno de los procesos, entradas y salidas descritas en la Figura 1 y la Tabla 1 se presenta a continuación:

- T: Procesos transversales a todas las etapas.
- V: Entradas de materia prima en etapa de extracción de materia prima y fabricación de materiales de obra.
- B: Entradas de transporte nacional en etapa de transporte de materiales a obra.
- P: Entradas de transporte internacional en etapa de transporte de materiales a obra.
- X: Entradas de consumos energéticos y combustibles en etapa constructiva.
- Y: Entradas de transporte nacional en etapa de transporte de RCD.
- W: Salidas de residuos en etapa de disposición/aprovechamiento de RCD.

En la Tabla 1 no se presenta la entrada X2 ni la salida Z1 para el proceso T2 durante la etapa constructiva. Esto se debe a que ambos correspondían a flujos de materiales de la edificación con emisiones cero.

2.3. Diseños de mezcla utilizados

En la Tabla 2 se presentan los diseños de mezcla utilizados en el análisis. Ambos diseños de mezcla fueron reportados por la constructora durante la ejecución del proyecto. Se puede observar que, además de los materiales convencionales, el concreto premezclado utilizó aditivos superplastificantes y como material cementante suplementario cenizas volantes.

Tabla 2. Diseños de mezcla utilizados en el modelo.

Material	Premezclado	Preparado en obra
	kg/m ³	
Cemento	268,5	463,4
Agregados finos	976,0	565,3
Agregado grueso	941,5	1.195,6
Agua	188,5	190,0
Ceniza volante	20,0	-
Aditivo 1	1,9	-
Aditivo 2	1,0	-

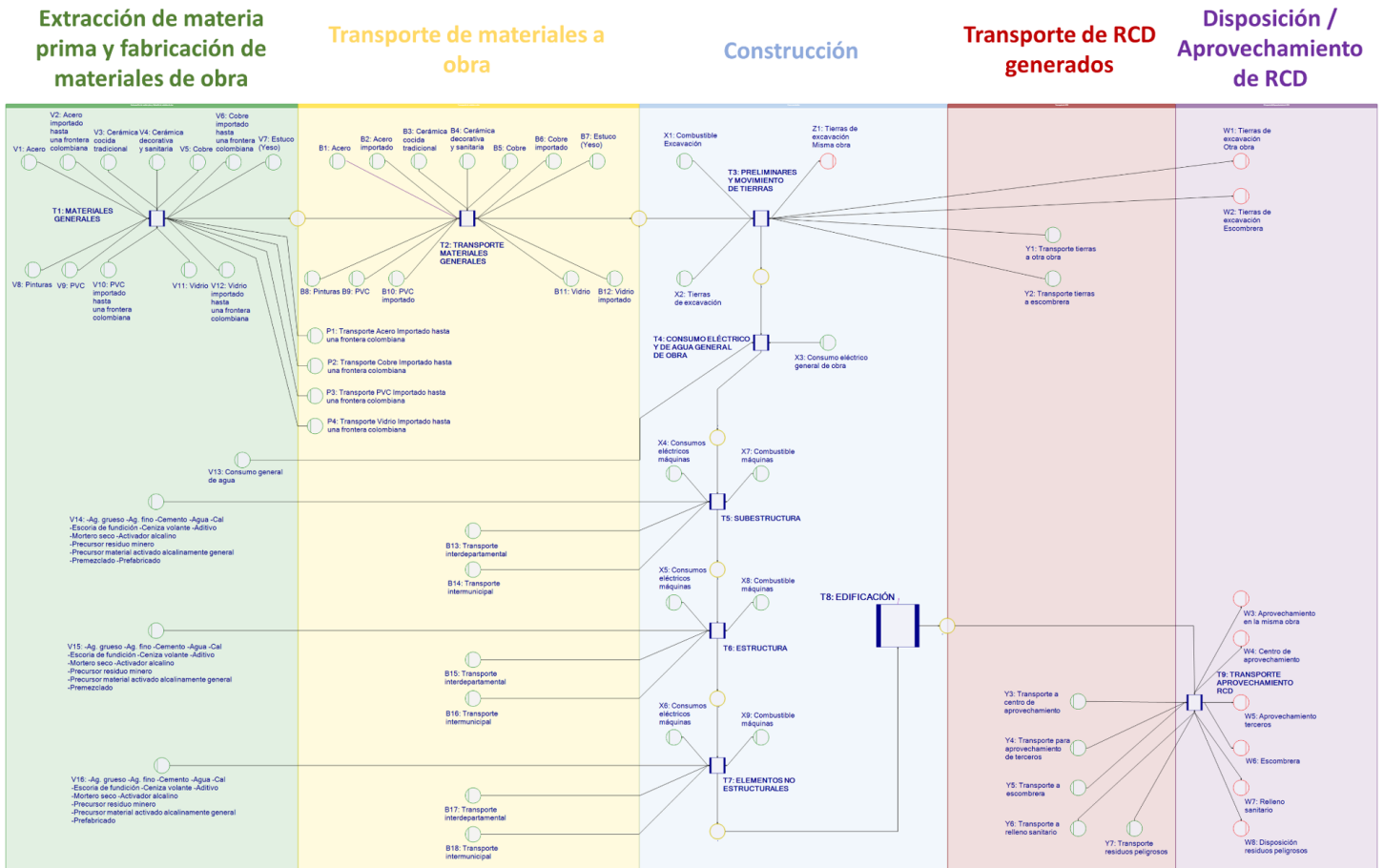


Figura 1. Esquema de la simulación mediante el software UMBERTO NXT CO2.

Tabla 1. Descripción del modelo.

Etapa	Procesos	Entradas	Salidas	Emisiones asociadas
Extracción de materia prima y fabricación de materiales de obra	T1	V1 a V12	-	Emisiones asociadas a la extracción y manufactura de los materiales generales, tanto a nivel nacional como internacional de materiales generales: Acero, cerámica cocida tradicional, cerámica decorativa y sanitaria, cobre, yeso (estuco), pinturas y vidrio.
	T3 a T7	V13 a V16	-	Emisiones asociadas a la extracción y manufactura de los materiales para concreto: Agregados gruesos, agregados finos, cemento, agua, cal, escoria de fundición, ceniza volante, aditivo, mortero seco, activador alcalino, precursor residuo silíceo-aluminoso, precursor residuo silíceo-aluminoso, precursor material activado alcalinamente general, concreto premezclado y prefabricados.
Transporte de materiales a obra	T1	P1 a P4	-	Emisiones asociadas al transporte oceánico hasta una frontera colombiana para materiales importados.
	T2 a T7	B1 a B18	-	Emisiones asociadas a consumos de combustibles de vehículos transportadores.
	T2	-	-	Flujo manual.
Construcción	T3 a T7	X1, X7 a X9	-	Emisiones asociadas a consumos de combustibles de máquinas de excavación, adecuación del suelo, mezcladoras portátiles, equipos de bombeo y máquinas vibradoras.
	T4 a T7	X3 a X6	-	Emisiones asociadas a energía eléctrica, tanto para las mezcladoras portátiles como para las máquinas vibradoras.
	T8	-	-	Edificación: Flujo de referencia.
Transporte de RCD	T9	Y1 a Y7	-	Emisiones asociadas a consumos de combustible de vehículos transportadores.
Disposición / Aprovechamiento de RCD	T9	-	W1 a W8	Emisiones generadas por la disposición de diferentes residuos.

2.4. Análisis estadístico bayesiano para la aproximación en los consumos de combustible de volquetas

Para la constructora resultó imposible registrar el consumo de combustible en todos sus trayectos. Como solución se tuvo un acercamiento con la Asociación de Volqueteros Unidos de Antioquia (A.V.A), con sede en la ciudad de Medellín, y se procedió a establecer un modelo estadístico bayesiano que permitiera generar una función de consumo de combustible Diésel comercial. Se establecieron las siguientes variables para el consumo de combustible: la inclinación máxima y la inclinación promedio de la topografía del terreno, las toneladas de material transportado y el modelo del vehículo. Es importante destacar la topografía del terreno ya que la ciudad de Medellín se encuentra localizada en un valle (Valle de Aburrá) con variaciones de pendiente muy significativas en su superficie, como se observa en la Figura 2.

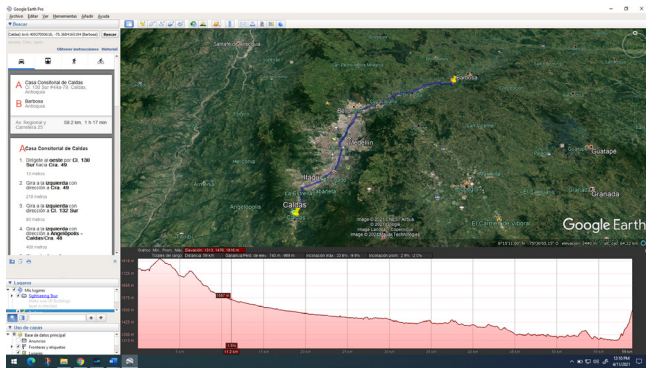


Figura 2. Perfil de elevación entre los municipios extremos del Valle de Aburrá a partir del software Google Earth Pro. Ruta desde Caldas hasta Barbosa.

La distribución a posteriori y la generación de los factores de consumo de combustible corresponden a la información

relacionada a la inclinación máxima, ya que el proceso estadístico realizado mediante la inclinación promedio generaba unas desviaciones de más del 200% al comparar la función con valores reales de consumo. Esto es debido a que al trabajar con la inclinación promedio, se perdían características de inclinación proporcionales a los consumos de combustible durante ascenso y descenso.

Para establecer la inclinación máxima y la inclinación media en función de la topografía del terreno, se utilizó el software Google Earth Pro, usando el perfil de elevación de las rutas. La cantidad de combustible se midió desmontando el tanque del vehículo tanto antes de iniciar el recorrido como luego de llegar a su destino. A través del uso de este software se generaron las rutas de transporte, las cuales fueron seguidas por diferentes volquetas. Se llevaron a cabo 13 experimentos, con diferentes rutas y diferentes modelos de vehículos. Es importante resaltar que el Protocolo PAS 2050 y el GHG Protocol establecen que, para el transporte de materiales se debe tener en cuenta tanto el desplazamiento hasta el lugar de destino con material de carga, como el desplazamiento hasta el lugar de partida sin material de carga. Para cada una de las rutas, en la Tabla 3 se presentan los resultados. Es importante resaltar que la inclinación máxima es diferente en los trayectos de ida y regreso, debido a que las rutas son diferentes por la distribución y ordenamiento territorial.

2.4.1. Distribución a priori

Para la distribución a priori de la media y la desviación estándar, el análisis de la elicitación se llevó a cabo por el método Roulette, a través de la herramienta online Match (22). Se establecieron intervalos de consumo de combustible para la ruta más concurrida (Agregados del Norte – Bonavento) durante seis meses por veinte conductores. Se establecieron formatos en los cuales estimaban el consumo de combustible para la ruta, asumiendo modelos de vehículo anteriores al año 2000 y superiores al año 2000 y con carga máxima en ida y vacíos de regreso. Los resultados de la elicitación se presentan en la Tabla 4.

Tabla 3. Resultados del experimento.

Ruta	Transporte de ida				Transporte de regreso			Modelo del vehículo (año)
	Inclinación máxima (km)	Material transportado (toneladas)	Consumo de combustible (galones)	Galones/(Ton*km)	Inclinación máxima (km)	Consumo de combustible (galones)	Galones/km	
Ruta 1	3,4	27,0	4,0	0,0442	3,2	3,0	0,9493	2008
Ruta 2	3,4	30,0	4,5	0,0447	3,7	3,5	0,9562	2008
Ruta 3	5,4	28,0	7,0	0,0461	4,6	4,5	0,9720	2009
Ruta 4	5,4	28,0	7,0	0,0461	4,6	4,5	0,9720	2009
Ruta 5	3,3	29,0	4,0	0,0422	4,0	3,5	0,8832	2014
Ruta 6	6,9	30,0	8,5	0,0408	5,1	4,5	0,8832	2014
Ruta 7	7,2	30,0	9,0	0,0417	6,2	5,5	0,8811	2014
Ruta 8	7,5	29,0	10,0	0,0457	4,6	4,5	0,9759	2008
Ruta 9	7,5	29,0	10,0	0,0457	4,6	4,5	0,9759	2008
Ruta 10	7,8	16,0	17,0	0,1371	5,6	13,5	2,4132	1956
Ruta 11	7,8	16,0	16,5	0,1330	5,8	14,5	2,5025	1956
Ruta 12	5,9	14,0	12,5	0,1519	7,8	15,5	1,9995	1971
Ruta 13	4,5	13,0	9,5	0,1635	3,6	7,0	1,9493	1979

Tabla 4. Resultados de la elicitación para la media y la desviación estándar.

Parámetros de la elicitación		Modelo posterior al año 2000	Modelo anterior al año 2000
Ida			
Media	Tipo de distribución	Normal	Normal
	Parámetros de la distribución	$\mu = 9,029487$	$\mu = 18,36118$
		$\sigma = 0,1163786$	$\sigma = 0,335716$
Regreso			
Media	Tipo de distribución	Normal	Normal
	Parámetros de la distribución	$\mu = 4,086247$	$\mu = 8,594661$
		$\sigma = 0,1024839$	$\sigma = 0,2442346$
Ida y regreso (indistintamente)			
Desviación	Tipo de distribución	Gama	Gama
	Parámetros de la distribución	$k = 27,85001$	$k = 42,95321$
		$\theta = 52,4223$	$\theta = 23,10992$

2.4.2. Distribución a posteriori

Para la distribución a posteriori, la distribución gama supone una a priori natural conjugada para la desviación estándar. Además, se tiene una a priori normal para la media, por lo cual se puede llegar a una distribución del tipo Normal-Normal-Gama (28), presentada en [1].

$$[1] \propto \lambda^{\alpha + \frac{n}{2} - 1} * \exp \left[-\lambda \beta - \frac{1}{2\sigma_0^2} (\mu - \mu_0)^2 - \frac{\lambda}{2} \sum_{i=1}^n (y_i - \mu)^2 \right],$$

$$\propto (\mu, \lambda)$$

2.4.3. Estimación del combustible mediante el muestreador de Gibbs

Examinando el kernel de la distribución propuesta en [1] y partiendo de los modelos normal-normal y normal-gama (23), se puede llegar a dos distribuciones condicionales, las cuales definen el muestreador de Gibbs. Estos se definen en [2] para la media y en [3] para la desviación estándar:

$$[2] \quad \mu \sim f(y, \lambda) \sim N \left((1 - k)\mu_0 + k\underline{y}, k \frac{\sigma^2}{n} \right),$$

$$k = \frac{n}{n + \left(\frac{1}{\lambda \sigma_0^2} \right)}, \quad \sigma^2 \equiv \frac{1}{\lambda}$$

$$[3] \quad \lambda \sim f(y, \mu) \sim G \left(\alpha + \frac{n}{2}, \beta + \frac{1}{2} \left((n - 1)s^2 + n(\mu - \underline{y})^2 \right) \right)$$

El muestreador de Gibbs se comenzó en $\mu=0$ y $\lambda=1$ y se corrieron 30.000 iteraciones. Se quemaron las primeras 10.000 iteraciones y se calcularon la media y la mediana de la simulación. En la Tabla 5 se presenta el resumen de las medias y medianas de cada una de las distribuciones a posteriori para los vehículos con modelo posterior al año 2000 en ida, modelo posterior al año 2000 en regreso, modelo anterior al año 2000 en ida y modelo anterior al año 2000 en regreso. Se puede observar que la media y la mediana son bastante cercanas, por lo cual los cálculos posteriores se llevaron a cabo con base a la media. La media (μ) corresponde al coeficiente de predicción, que posteriormente será multiplicado por la distancia en inclinación máxima y las toneladas, según el tipo de recorrido. La desviación estándar (λ) corresponde no a la desviación del coeficiente, sino a la desviación de la predicción de consumo de combustible una vez multiplicada por la pendiente máxima y las toneladas, según el tipo de recorrido.

2.4.4. Generación de los factores de consumo de combustible

Tomando en cuenta las medias presentadas en la Tabla 5, se presentan las ecuaciones para la predicción del consumo de combustible en la Tabla 6. Los galones de combustible obtenidos pueden multiplicarse por el factor de emisión del Diésel comercial y de esta manera obtenerse las emisiones. A modo de comprobación final, las ecuaciones de predicción de consumo se compararon con consumos reales solo en un trayecto, debido al proceso de cuantificación de combustible (desmonte de tanques). Las ecuaciones para modelos posteriores al año 2000 en ida y regreso dieron como resultado una desviación de 0,3 y 0,2 galones de combustible respectivamente.

Tabla 5. Resumen medias y medianas para las distribuciones de las cadenas mu y lambda.

Modelo de vehículo y tipo de viaje	Distribución μ		Distribución λ	
	Media	Mediana	Media	Mediana
Modelo posterior al año 2000 en ida	0,04180009	0,04180214	0,6173791	0,6106171
Modelo posterior al año 2000 en regreso	0,9727508	0,9725788	0,6168487	0,6108077
Modelo anterior al año 2000 en ida	0,1593965	0,1594039	1,943898	1,927761
Modelo anterior al año 2000 en regreso	2,050313	2,050437	1,931101	1,917809

Tabla 6. Ecuaciones de predicción de consumo de combustible.

Modelo de vehículo y tipo de viaje	Predicción de consumo de combustible Diésel (gal)
Modelo posterior al año 2000 en ida	(4) $0,0418 * KmIncmáx * Ton$
Modelo posterior al año 2000 en regreso	(5) $0,9728 * KmIncmáx$
Modelo anterior al año 2000 en ida	(6) $0,1594 * KmIncmáx * Ton$
Modelo anterior al año 2000 en regreso	(7) $2,0503 * KmIncmáx$

Por su parte, las ecuaciones para modelos anteriores al año 2000 en ida y regreso dieron como resultado una desviación de 0,5 y 0,4 galones de combustible respectivamente. Este aumento en la desviación probablemente se relaciona con los modelos comparados. En los vehículos anteriores al año 2000 el modelo más reciente es el año 1979 y la comparación se llevó a cabo con un vehículo del año 1990.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Huella de carbono y energía incorporada

En la Figura 3 se presenta el resultado del modelo en Diagrama Sankey para el Proyecto X analizado.

En la Figura 4a se muestra el cálculo de la huella de carbono y en la Figura 4b el cálculo de la energía incorporada para el Proyecto X. Para un consumo de materiales de 22.851.252,9 kilogramos, se produjeron 3.336.148,4 kg CO₂ eq y se consumieron 29.435.585,8 MJ. Teniendo en cuenta que es una edificación de vivienda multifamiliar en altura, con 9.568,67 m² construidos, se puede inferir que la huella de carbono equivale a 348,7 kg CO₂ eq/m² construido y la energía incorporada equivale a 3.076,2 MJ/m².

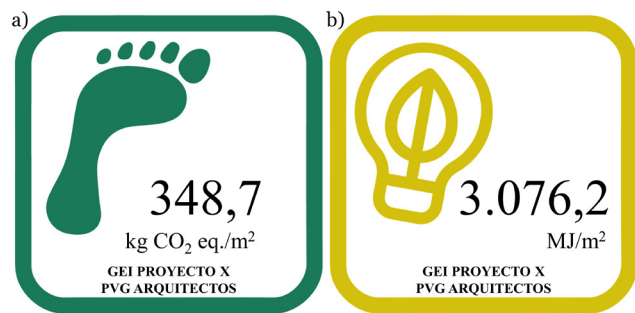


Figura 4. Proyecto X, cálculos a partir de la información suministrada por la Constructora X. a) Huella de carbono y b) Energía incorporada.

En la Tabla 7 se muestra la cantidad, en kg CO₂ equivalente y MJ, para cada una de las etapas de la edificación. Se observa que la etapa de extracción de materia prima y fabricación de materiales genera más del 93% para la huella de carbono y más del 87% para la energía incorporada. Las demás fases no presentan porcentajes significativos respecto al total de las emisiones y los consumos energéticos.

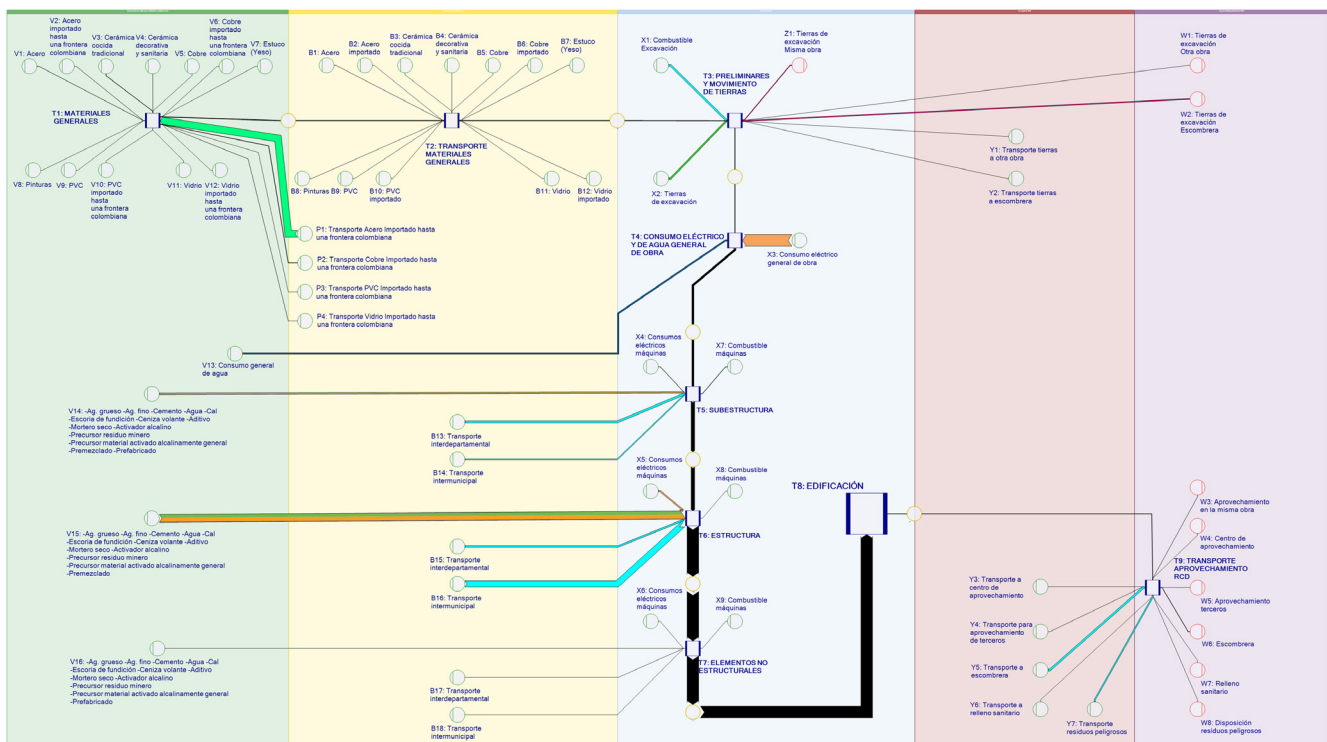


Figura 3. Resultado del modelo en formato Sankey Diagram para el Proyecto X.

Tabla 7. Huella de carbono, energía incorporada y porcentajes por etapa en el ciclo de vida del Proyecto X.

Fase	Huella de carbono		Energía incorporada	
	kg CO ₂ -eq./m ²	Porcentaje (%)	MJ/m ²	Porcentaje (%)
Extracción de materia prima y fabricación de materiales de obra	324,3	93,01	2.694,1	87,58
Transporte de materiales a obra	19,2	5,52	359,3	11,68
Construcción	2,5	0,71	22,9	0,74
Transporte de RCD generados durante la etapa constructiva	1,1	0,31	-	-
Disposición/aprovechamiento de RCD generados durante la etapa constructiva	1,6	0,45	-	-
Total	348,7		3.076,2	

3.2. Análisis por etapas

3.2.1. Extracción de materia prima y fabricación de materiales de obra

En la Tabla 8 se presenta un análisis detallado de la etapa Extracción de materia prima y fabricación de materiales de obra. Se puede observar que los materiales con mayor porcentaje de emisiones y energía incorporada son el cemento (41,26% de las emisiones y 38,01% de la energía incorporada) y el acero (29,46% de las emisiones y 17,12% de la energía incorporada), lo cual se debe tanto a su intensidad material por m² como a su elevado factor de emisión. Caso

contrario ocurre con los agregados, en los cuales a pesar de su elevada intensidad material por m², los factores de emisión no permiten que su influencia en la generación de emisiones o energía incorporada sea representativa respecto al total (3,62% en emisiones y 12,21% en energía incorporada para ambos tipos de agregados).

Para estos valores de cemento, agua, agregados, aditivo y ceniza, la constructora reporta un consumo de 250 m³ de concreto premezclado para las pilas de cimentación y 4.028,1 m³ de concreto preparado en obra para otros elementos de la subestructura y elementos estructurales, como se observa en la Tabla 9. Un análisis interesante que

Tabla 8. Análisis para la etapa Extracción de materia prima y fabricación de materiales de obra para el Proyecto X. Intensidad material, huella de carbono y energía incorporada por m².

Material	kg/m ²	Huella de carbono		Energía incorporada	
		kg CO ₂ -eq./m ²	Porcentaje (%)	MJ/m ²	Porcentaje (%)
Acero	17,16	77,20	22,14	189,10	6,15
Acero importado	11,44	25,51	7,32	337,48	10,97
Cerámica cocida tradicional	48,30	10,46	3,00	116,89	3,80
Cerámica decorativa y sanitaria	9,20	7,39	2,12	7,76	0,25
Polivinil cloruro	2,10	15,03	4,31	138,62	4,51
Estuco	2,20	0,44	0,13	2,27	0,07
Pinturas	0,40	0,16	0,05	2,04	0,07
Cobre	1,45	21,40	6,14	244,06	7,93
Cobre importado	1,05	5,00	1,43	70,60	2,30
Vidrio	0,72	2,17	0,62	28,33	0,92
Vidrio importado	0,59	0,57	0,16	9,31	0,30
Agregados gruesos en obra	816,44	2,04	0,59	69,48	2,26
Agregados gruesos (concreto premezclado)	22,63	0,06	0,02	1,93	0,06
Agregados finos en obra	732,64	10,18	2,92	294,89	9,59
Agregados finos (concreto premezclado)	23,46	0,33	0,09	9,44	0,31
Cemento en obra	121,18	136,58	39,17	1.110,15	36,09
Cemento (concreto premezclado)	6,45	7,27	2,09	59,13	1,92
Ceniza volante	0,48	0,01	0,00	0,07	0,00
Aditivo	0,07	0,04	0,01	1,18	0,04
Agua (concreto premezclado)	4,53	0,04	0,01	0,02	0,00
Agua concreto en obra	49,68	0,44	0,13	0,25	0,01
Agua general	221,67	1,97	0,57	1,11	0,04
Total	2.093,83	324,29	93,01	2.694,10	87,58

Tabla 9. Cantidades de concreto (m³) premezclado y preparado en obra, reportados por la Constructora X.

Etapa	Elementos	Concreto (m ³)	
		Premezclado	Preparado en obra
Subestructura	Pilas de cimentación	230	1.300,50
	Fundaciones (vigas y dados)	-	105,3
Estructura	Cubierta	-	49,2
	Losas	-	1.505,10
	Escaleras	-	60,1
	Columnas	-	59,8
	Muros estructurales	-	948,10
Total		4.258,10	

Tabla 10. Análisis para la etapa Transporte de materiales de obra para el Proyecto X. Huella de carbono y energía incorporada por m².

Transporte	kg CO ₂ -eq./m ²	Porcentaje (%)	MJ/m ²	Porcentaje (%)
Internacional general	1,09	0,31	325,58	10,58
Interdepartamental cemento	4,06	1,16	7,66	0,25
Municipal cemento	0,48	0,14	0,91	0,03
Municipal agregados	6,09	1,75	11,49	0,37
Municipal premezclado	0,26	0,07	0,49	0,02
Interdepartamental general	6,24	1,79	11,78	0,38
Municipal general	1,03	0,30	1,36	0,04
Total	19,24	5,52	359,28	11,68

sugieren estos valores es que la cantidad de cemento reportado por la constructora, para el diseño de mezcla indicado, sugiere una cantidad aproximada de 2.502,2 m³ de concreto preparado en obra, muy diferente a los 4.258,1 m³ reportados. Es decir, la cantidad de cemento no es proporcional a la cantidad de concreto reportado. Partiendo de la premisa de que la cantidad de cemento fuera proporcional a la cantidad de concreto por el diseño de mezcla indicado, hay un sobrante aproximado de 503,8 kg/m² de agregados gruesos y 584,8 kg/m² de agregados finos. Además, es imposible utilizar esta cantidad de agregados en la edificación, ya que por más RCD que se generen, sigue siendo una cantidad exorbitante de agregados a incluir en la edificación para la cantidad de concreto empleado. Este tipo de análisis sugiere la necesidad de llevar a cabo auditorías en los consumos de materiales al momento de llevar a cabo análisis en indicadores ambientales, ya que materiales faltantes o sobrantes de elevada huella de carbono o energía incorporada como el cemento pueden tener una alta incidencia en los indicadores finales para las edificaciones.

3.2.2. Transporte de materiales de obra

En la Tabla 10 se presenta un análisis detallado de la etapa Transporte de materiales de obra. Se puede observar que el transporte municipal de agregados (Bello, La Estrella y Girardota) ubicados a una distancia del proyecto de máximo 35 km e interdepartamental y municipal de cemento (Planta el Cairo hasta Planta Caribe y luego hasta la obra) ubicados a una distancia de máximo 95 km presenta la mayor cantidad de emisiones (3,12%) y energía incorporada (0,67%), relacionado al consumo de materiales de concreto. A pesar que la intensidad material para agregados en obra es tan

elevada, el hecho de que el transporte haya sido enteramente municipal reduce considerablemente la cantidad de emisiones y energía incorporada, tomando en cuenta que el traer agregados por fuera del Valle de Aburrá aumenta considerablemente ambos indicadores. Por otra parte, el transporte de la sumatoria de los demás materiales, en ambos indicadores, es casi equivalente con 2,09% para la huella de carbono y 0,43% para la energía incorporada. Además, se puede observar claramente que el transporte internacional de materiales, para la huella de carbono, sólo representa un porcentaje muy bajo del total (0,31%), mientras que para la energía incorporada representa un alto porcentaje (10,58%). Esto se relaciona de manera directa a los factores de emisión, en donde el transporte internacional corresponde a 0,01 kg CO₂-eq/t*km y 3 MJ/t*km. A pesar de las diferencias en los porcentajes para transporte internacional, se puede inferir que no necesariamente el importar materiales aumenta en grandes proporciones la huella de carbono y la energía incorporada.

3.2.3. Construcción

En la Tabla 11 se presenta un análisis detallado de la Etapa constructiva. Se puede observar que el consumo de combustible durante el proceso de excavación representa un porcentaje de 0,31% de las emisiones y 0,07% de la energía incorporada, lo cual se debe a que removieron 1.461,54 m³ de tierras de excavación, equivalentes mediante el estudio de suelos a una cantidad de 2.816,4 toneladas. En relación al consumo eléctrico, el proyecto tuvo un consumo de 54.680 kWh durante todo el proceso constructivo, equivalentes al 0,36% de las emisiones y el 0,01% de la energía incorporada.

Tabla 11. Análisis para la etapa Construcción para el Proyecto X. Huella de carbono y energía incorporada por m².

Transporte	kg CO ₂ -eq./m ²	Porcentaje (%)	MJ/m ²	Porcentaje (%)
Excavación tierras	1,09	0,31	2,05	0,07
Bombeo concreto premezclado	0,14	0,04	20,57	0,67
Consumo eléctrico	1,25	0,36	0,27	0,01
Total	2,48	0,71	22,89	0,74

3.3. Transporte de RCD y Disposición/aprovechamiento de RCD generados durante la etapa constructiva

En la Tabla 12 se puede observar que el transporte de los escombros (hasta Girardota) ubicados a una distancia del proyecto de máximo 40 km representa el 0,10% de las emisiones, siendo el más representativo para el transporte de RCD. Por otra parte, los RCD de mayor impacto ambiental son los residuos que van a la escombrera, representando el 0,38% de las emisiones. El porcentaje de escombros se atribuye a 628,4 toneladas de escombros generados durante la obra.

Tabla 12. Análisis para las etapas Transporte de RCD y Disposición/aprovechamiento de RCD generados durante la etapa constructiva para el Proyecto X. Huella de carbono por m².

Transporte	kg CO ₂ -eq./m ²	Porcentaje (%)
Transporte residuos general	0,72	0,21
Transporte a vertedero	0,36	0,10
Otros residuos tipo escombros	0,24	0,07
Escombros	1,31	0,38
Total	2,63	0,76

4. CONCLUSIONES

Este artículo presenta un método usado para la cuantificación y análisis de la huella de carbono y la energía incorporada de una edificación de vivienda multifamiliar en altura

5. REFERENCIAS

- (1) Anand, C. K., & Amor, B. (2017). Recent developments, future challenges and new research directions in LCA of buildings: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67: 408–416. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.058>
- (2) Naciones Unidas (2015). Convención marco sobre el cambio climático. acuerdo de París. *Conferencia de las partes, 21er período de sesiones*, 21930.
- (3) 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>
- (4) Penagos, G. (2016). Políticas de construcción sostenible como herramienta de mitigación y adaptación frente al cambio climático. In: *Cambio climático: Lecciones de y para ciudades de América Latina*, E. ALISTE, 1st ed., ch. 2, U. Externado de Colombia, Bogotá, Colombia.
- (5) IDEAM. (2015). Proyecto Informe Bienal De Actualización, Bogotá, Colombia.
- (6) García Arbeláez, C., Vallejo López, G., Higgins, M. Lou, et al. (2016). EL Acuerdo de París. así actuará Colombia frente al cambio climático. *WWF-Colombia*, Cali, Colombia.
- (7) Cabeza, L. F., Rincon, L., Vilario, V., et al. (2014). Life cycle assessment (lca) and life cycle energy analysis (lcea) of buildings and the building sector: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29: 394–416. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.037>

en Medellín en varias etapas del ciclo de vida. Los resultados indicaron que:

- La fase de mayor impacto ambiental fue la de extracción y manufactura de materiales, en donde el cemento y el acero son los materiales con mayores porcentajes en ambos indicadores. Esto se debe tanto a su intensidad material por m² como a su elevado factor de emisión.
- Los inventarios de emisiones de GEI, tanto en el ámbito internacional como nacional, disgregan el ciclo de vida del sector constructor en otros sectores económicos (minería, industria, energía, transporte, etc.), por lo tanto, si se desea conocer su impacto y sus oportunidades de mitigación se debe abordar su análisis de manera articulada e integral.
- El presente estudio aporta a la elaboración de una línea base de emisiones de GEI para el sector constructor en Colombia, lo cual permitirá establecer prioridades sectoriales, ajustadas a la realidad nacional. Esto constituye justamente la base para la formulación de las Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC, por sus siglas en inglés), que son el sustrato del Acuerdo de París, COP21.
- Si bien el estudio se hace para una edificación en la ciudad de Medellín, los valores de emisión relacionados con la extracción y manufactura de materiales, fase constructiva y disposición de residuos, pueden considerarse válidos en el territorio nacional, considerando sistemas constructivos similares al analizado, el cual es el más representativo a nivel nacional. De esta forma, los únicos valores de emisión que son realmente específicos a escala local son los relacionados con el transporte.
- Como valor agregado de este estudio se resalta el modelo propuesto para el cálculo de emisiones asociadas al transporte, el cual resulta útil, no sólo para el sector constructor, sino para el transporte de carga en general y constituye justamente el primer reporte de un factor de emisión para el transporte de carga asociado a la geografía nacional.

- (8) Chau, C. K., Leung, T. M., Ng, W. Y. (2015). A review on life cycle assessment, life cycle energy assessment and life cycle carbon emissions assessment on buildings. 143: 395–413. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.023>
- (9) Luo, L., & Chen, Y. (2020). Carbon emission energy management analysis of LCA-Based fabricated building construction. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 27: 100405. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2020.100405>
- (10) Butera, S., Christensen, T. H., Astrup, T. F. (2015). Life cycle assessment of construction and demolition waste management. *Waste Management*, 44: 196–205. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.07.011>
- (11) Hu, M., & Milner, D. (2020). Visualizing the research of embodied energy and environmental impact research in the building and construction field: A bibliometric analysis. *Developments in the Built Environment*, 3: 100010. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2020.100010>
- (12) 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, Santiago de Cali, Colombia.
- (13) Gamboa, C. N. Q. (2016). Análisis de la energía incorporada y emisiones de CO₂ aplicado a viviendas unifamiliares de eficiencia energética, M. Sc., Universidad Politécnica de Cataluña Escuela, Cataluña, España.
- (14) ISO 14067. (2018). Greenhouse gases – carbon footprint of products – requirements and guidelines for quantification.
- (15) The British Standards Institution. (2011). PUBLICLY available specification pas 2050: 2011 specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services, p. 1–45.
- (16) WBCSD, WRI. (2011). Quantifying the greenhouse gas emissions of products: pas 2050 and the ghg protocol product standard: a short guide to their purpose, similarities and differences, p. 1–4.
- (17) Hamburg, I. (2019). UMBERTO NXT CO₂.
- (18) UPME. (2017). Informe mensual de variables de generación y del mercado eléctrico colombiano, Subdirección de Energía Eléctrica - Grupo Generación, Medellín, Colombia.
- (19) Ecoinvent. (2013). Bases de datos versión 3.01, Zurich, Switzerland.
- (20) Energy, E. (2016). EDGE materials.
- (21) Arrieta, A. A., Janna, F. C., López, D., et al. (2016). Consultoría técnica para el fortalecimiento y mejora de la base de datos de factores de emisión de los combustibles colombianos- FECOC, Medellín, Colombia.
- (22) Morris, D. E., Oakley, J. E., Crowe, J. A. (Feb. 2014). A web-based tool for eliciting probability distributions from experts, *Environmental Modelling And Software*, 52: 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.10.010>
- (23) Puza, B. (2015). Bayesian methods for statistical analysis, ANU eView, Australia.