Software innovador para el cálculo de la huella de carbono y energía incorporada en proyectos de construcción

Nelson Castaño Ciro
Ingeniero Químico. SENA. ncastano@sena.edu.co. Medellín.
Elizabeth Serna Gutiérrez
Ingeniera Civil. SENA. eserna@sena.edu.co, Medellín.
Mary Luz Ocampo
Ingeniera ambiental. SENA. mocampoo@sena.edu.co, Medellín.

RESUMEN

Objetivo: El objetivo principal de esta investigación fue calcular la huella de carbono y la energía incorporada en materiales de construcción desarrollando un algoritmo aplicado a un software de modelación de edificaciones. Metodología o método: inicialmente, se hizo un estudio exploratorio en fuentes confiables de información, lo cual permitió elaborar bases de datos de fichas de materiales y elementos de construcción que contienen información importante sobre equivalentes de CO^2 por kilogramo, energía primaria renovable y no renovable. Con la información recolectada y mediante el aplicativo del software de modelado Revit API (Application Programming interface, Autodesk) se elaboró un algoritmo utilizando el lenguaje de programación C# (Microsoft) que dio como el resultado un Plugin, el cual, en común acuerdo con el equipo de investigación, se decidió llamarlo "SIMULHE" (SIMULación de Huella de carbono y Energía incorporada). Este mismo se instaló como un complemento en Revit. Resultados: El plugin creado permite hacer el cálculo de huella de carbono y energía incorporada en los materiales incluidos en un modelo en Revit nuevo o ya existente. Conclusiones: el plugin es novedoso, ya que en la búsqueda de información exhaustiva realizada inicialmente, no se encontró un software de modelado con esta característica. Otra ventaja es que permite comparar dos materiales con una función similar y tomar la decisión sobre cuál es mejor para disminuir la huella de carbono y la energía incorporada en el modelo de construcción creado.

Palabras clave: calentamiento global, ciclo de vida, energía incorporada, huella de carbono, Revit, Revit API.

ABSTRACT

Objective: The main objective of this research was to calculate the carbon footprint and the embodied energy in construction materials by developing an algorithm applied to building modeling software. Methodology or method: initially an exploratory study was carried out on reliable sources of information, which allowed the creation of databases of materials and

construction elements sheets that contain important information on CO2 equivalents per kilogram, renewable and non-renewable primary energy. With this information collected and through the Revit API (Application Programming interface, Autodesk) modeling software application, an algorithm was developed using the C# programming language (Microsoft) that resulted in a Plugin, which, in common agreement with the research team, it was decided to call it “SIMULHE” (SIMULATION of Carbon Footprint and Embodied Energy). This was installed as a plugin in Revit. Results: The plugin created allows the calculation of carbon footprint and embodied energy in the materials incorporated in a new or existing Revit model. Conclusions: the plugin is novel, since in the exhaustive information search that was initially done, no construction modeling software with this advantage was found. Another advantage is that it allows you to compare two materials with a similar function and make the decision which of these is better to reduce the carbon footprint and the energy incorporated in the created construction model.

Keywords: carbon footprint, embodied energy, Revit, Revit API, Lifecycle; sustainability, global warming.

1. INTRODUCCIÓN

El planeta Tierra está siendo afectado por contaminantes atmosféricos que causan el calentamiento global, generados por el gran crecimiento demográfico y sus actividades humanas. A pesar de que la industria de la construcción representa el 5,1% del PIB del país, el 3,4% de la entrada total de IED y el 7,2% del empleo formal (ANDI, 2022), también es una de las actividades humanas más contaminantes y consumidoras de energía a nivel mundial, ocasionando cambios negativos en el medio ambiente. Los materiales usados en la industria de la construcción producen una gran cantidad de carbono y consumen grandes cantidades de energía y agua (Kouhirostamkolaei et al., 2023). Debido a lo anterior, se han establecido varios objetivos a nivel mundial con el fin de mitigar este daño, y uno de los más importantes es el establecido por la ONU con sus 17 objetivos de desarrollo sostenible (ONU, 2015) mediante la agenda 2030.

Lo anterior se convierte en un paradigma para la industria de la construcción, ya que la evaluación y el cálculo de los impactos ambientales son siempre un desafío para cada edificio con diversas funciones, ya sea durante o después de la fase de construcción, durante la fase de operación o en el momento de la demolición.

En este sentido, La industria de la edificación se enfrenta a una creciente presión para reducir su impacto ambiental. Las emisiones de carbono y el uso excesivo de recursos naturales son algunos de los principales desafíos a los que se enfrenta este sector, que es la fuente principal de las emisiones a nivel mundial. Ante este escenario, el cálculo de la huella de carbono y la energía incorporada en los materiales y procesos constructivos ha pasado a ser una herramienta clave para evaluar y mitigar las afectaciones al ecosistema de los proyectos de obra.

Aunado a esto, existen actividades de origen antropogénico como la deforestación, la agricultura, la ganadería, la combustión de combustibles fósiles que generan un aumento de la cantidad de los gases de efecto invernadero (GEI). Otras de las actividades son los procesos industriales como el sector de la construcción, considerado uno de los más importantes en todos los países y así mismo uno de los más contaminantes. El sector de la construcción es importante para las aspiraciones globales del cambio climático, debido a que genera entre el 40 % y el 50 % de los gases de efecto invernadero (GEI) durante el ciclo de vida constructivo (Sharma et al., 2011).

En Colombia se calcula que, si no se toman medidas, las emisiones generadas podrían aumentar para el año 2030 en un 50 % más, aunque el país contribuye solo con el 0,46% de las emisiones globales generadas. Durante la Cumbre de Paris, Colombia hizo público su compromiso en la lucha contra el cambio climático. Dicho compromiso consiste en reducir las emisiones nacionales de GEI en un 20%, con respecto a las emisiones proyectadas para el año 2030, con la posibilidad de superar esta meta hasta llegar a un 30% en caso de recibir ayuda internacional (García et al., 2015). Sin embargo, en la cumbre climática COP 26 Colombia asume el reto de reducir en un 51% las emisiones de gases de efecto invernadero al año 2030 y alcanzar para el año 2050 el carbono neutro (Naciones Unidas, 2023). Para lograr esta mitigación, la industria de la construcción resulta estratégica, dado que se articula con los sectores clave de la economía.

En un proceso constructivo se mide la cantidad de gases causantes del calentamiento de la tierra emitidos a la atmósfera mediante el concepto de huella de carbono, ya que es posible evaluar estas emisiones a la atmósfera asociadas a la extracción, fabricación de los materiales y al ciclo de vida constructivo (Área Metropolitana del Valle de Aburrá et al., 2018).

Los datos de emisiones de un proyecto se basan en el uso de combustible, del emplazamiento y en las fuentes de combustible para generar la electricidad de la región, ya que produce más emisiones de CO^2 una central eléctrica alimentada con carbón, que una central hidroeléctrica para el mismo proyecto. Para el cálculo de emisiones de CO^2 en los Estados Unidos, se utilizan los datos de la agencia EPA (Environmental Protection Agency), que mantiene un registro de todas las centrales eléctricas de ese país. Para otros países utilizan datos CARMA (Carbon Monitoring for Action) (Autodesk, 2016).

Para cuantificar el impacto ambiental por construcción de un edificio, es necesario utilizar la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) que consiste en medir los impactos ambientales de manera objetiva en cada una de las fases de construcción.

a) Extracción y manufactura de materiales
b) Transporte hasta la obra
c) Construcción
d)Transporte, disposición y/o aprovechamiento de RCD generados hasta antes del comienzo de operación
e) Operación
f) Deconstrucción o demolición
g)Transporte, disposición y aprovechamiento de RCD finales (Área Metropolitana del Valle de Aburrá et al., 2018).

Estos parámetros con otros adicionales son los que se deberán tener en cuenta para la correcta selección de materiales con una baja huella de carbono y consumo energético incorporado. La figura 1 muestra los principales criterios para selección de materiales. Para llevar a cabo esta metodología, es necesario obtener la huella de carbono de los materiales de construcción en las diferentes bases de datos que se encuentran a nivel mundial (Ibañez et al., 2021). En muchos casos, esta información es clasificada o está muy alejada de la realidad nacional, lo cual se dificulta al momento de vincular al modelo BIM para cuantificar los datos ambientales que serán modelados, lo cual genera una percepción de complejidad de la evaluación del ciclo de vida, desconocimiento de la afectación ambiental que producen los materiales de construcción y debido a esto no se podrían aplicar criterios de sostenibilidad en la selección de materiales para la construcción de edificaciones.

Figura 1 . Principales criterios de selección de materiales. Elaboración propia.

2. METODOLOGÍA

2.1 Búsqueda de información

Es fundamental en toda investigación realizar una revisión a nivel mundial sobre los avances más importantes y recientes relacionados con el tema. En el tema central de este estudio, inicialmente se hizo una búsqueda en la base de datos Scopus con la siguiente ecuación de búsqueda: carbon AND footprint AND construction AND material AND energy y se encontraron 918 resultados en un rango de fechas entre 2004 y 2024. Pero esta búsqueda, si bien es cierto contiene la palabra "energy", no correspondía a la energía incorporada en el material de construcción. Se hizo una nueva ecuación de búsqueda con las siguientes palabras teniendo en cuenta la energía embebida o incorporada: carbon AND footprint AND material AND construction AND embodied AND energy. En este caso sólo arrojó 12 resultados, con una fecha inicial del 2014 hasta la fecha, como se observa en la figura 2. Lo cual se podría traducir en que, en la última década, las instituciones le están prestando más atención a los procesos de la elaboración de los materiales de construcción y la energía requerida para su obtención.

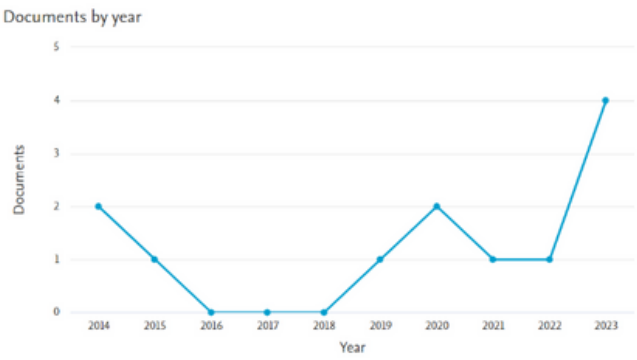

Figura 2. Resultado de la búsqueda en Scopus de la ecuación de búsqueda "carbon AND footprint AND material AND construction AND embodied AND energy". Fuente: Scopus.

Un análisis de las palabras más importantes en estos resultados, usando el software VOSviewer, se presenta en la figura 3. Se resalta que tiene una mayor fuerza de conexión la palabra de "huella de carbono", seguido de "diseño arquitectónico", "ciclo de vida", "desarrollo sostenible", entre otros.

Haciendo un análisis de los artículos se encontró que tres de los artículos usaron el software SimaPro (software analítico utilizado para medir la huella ambiental de productos y servicios de una manera objetiva y con un alto nivel de transparencia). Dos de ellos lo usaron de manera independiente (Filimonau et al., 2021) y (Biswas, 2014) y el tercero lo usó junto con la información contenida en Ecoinvent (Rodríguez et al., 2023). Mazelli y colaboradores (Mazelli et al., 2023) también usaron Ecoinvent con el software OpenLCA. Crippa y colaboradores (Crippa et al., 2020) analizaron la interoperabilidad entre un software de la metodología BIM con otro software de análisis de ciclo de vida (LCA).

Los colaboradores de los investigadores Tapper (Tapper & Dokka, 2019) y Shadram (Shadram et al., 2015) usaron software únicamente para el cálculo de la energía embebida en edificios. Araujo y colaboradores (de Araujo et al., 2023) utilizaron DesignBuilder para la evaluación de la eficiencia energética, medioambiental y económica de los edificios durante todo el proceso de diseño. Otros investigadores usaron el software UMBERTO NXT CO2 para el cálculo de la huella de carbono y la energía incorporada en un edificio (Pardo et al., 2022). Otros se limitaron a hacer los cálculos basándose en área y volúmenes (Kouhirostamkolaei et al., 2023) o en un software de la metodología BIM (Alwan & Jones, 2014).

Según esos análisis, no se encontró en la literatura consultada, un solo software que construya el modelo de un edificio bajo la metodología BIM, haga el cálculo de la huella de carbono y la energía incorporada de los materiales usados en el mismo modelo. Todos lo hacían de forma separada, lo cual puede ocasionar errores en los cálculos al omitir o incluir materiales que no pertenezcan al modelo, además los costos asociados para poder adquirir los softwares por separado.

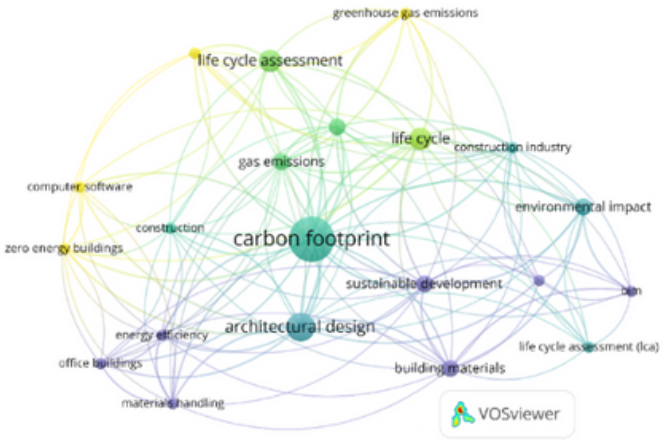

Figura 3. Fuerza de enlace de palabras. Fuente: VOSviewer.

2.2 Construcción de la base de datos

La idea principal debe orientarse a que por medio del plugin creado en la presente investigación se alimenta una base de datos propia sobre información de datos sostenibles de materiales de construcción, ya que la mayoría de los softwares comerciales contienen información de materiales generales y que, posiblemente, no tienen toda la información necesaria. Para el tema que se aborda, se tomó como base la información de las declaraciones ambientales de producto (EPD) suministrada por The International EPD System (The International EPD System, 2023), AENOR (AENOR, 2024), entre otros. una EPD es una Declaración Ambiental de Producto que informa de manera transparente datos objetivos, comparables y verificados por terceros sobre el desempeño ambiental de los productos y servicios desde una perspectiva del ciclo de vida.

Figura 4. Ejemplo de declaración ambiental de accesorios de bronce (The Internaional EPD System, 2023).

Las EPD de un fabricante se convierten en un compromiso de este para medir y reducir el impacto ambiental de manera transparente. Cuando se gestiona una EPD, lo cual puede durar entre 2 a 12 meses, se describe el ciclo de vida del producto y se realiza una evaluación. Estos resultados son revisados, verificados y aprobados por un tercero antes de registrarse y publicarse. El anterior proceso ratifica que la información de las EPDs es confiable sobre el desempeño ambiental del producto. La figura 4 representa un ejemplo de una declaración ambiental de accesorios de bronce y el contenido de dicho documento. El propósito del documento es proporcionar una evaluación ambiental detallada del ciclo de vida de las conexiones de presión Rifeng, específicamente sus impactos ambientales desde la extracción de materias primas

hasta la etapa de fabricación y transporte (“cradle-to-gate"). Además, busca ofrecer información transparente y verificable que permita a los actores involucrados comprender la huella ecológica del producto, apoyar prácticas de construcción sostenibles, facilitar comparaciones con otros productos similares y cumplir con estándares internacionales de evaluación ambiental como ISO 14025 y EN 15804.

De dicha información se lograron obtener 590 declaraciones de producto para conformar una base de datos en Excel (figura 5), lo cual sirvió como punto de partida para el proceso de desarrollo del plugin. Nótese que se reportan los equivalentes de kg de CO^2, la Energía Primaria Total Renovable (PERT) y la Energía Primaria Total No Renovable (PENRT) de cada uno de estos productos.

Nombre	DESCRIPCIÓN	kg Co2 Eq	PERT (MJ)	PENRT (MJ)
Acero - Alambre Pretensado Pf4	Cables de acero de alta resistencia y baja relajación, utilizados en la fabricación de elementos pretensados y	5,84E+02	1,62E+03	1,23E+04
Acero - Alambrón Para Mallazo Estructural	Productos largos de acero no aleado para construcción laminados en caliente procedentes de horno eléctrico: alambrón para la fabricación, por	1,00E+03	2,01E+03	1,94E+04
Acero - Cordón Plastificado P63	Los cordones (de 3 y 7 hilos) se emplea como principal materia prima el	9,24E+02	3,01E+03	2,46E+04
Acero - Cordones Desnudos P61 Y P62, Trenza Pc4	Los cordones (de 3 y 7 hilos) se emplea como principal materia prima el	6,09E+02	1,77E+03	1,30E+04
Acero - Malla Electrosoldada 4mm (kg)	La malla de acero de refuerzo se utiliza como dispositivo tensor en estructuras reforzadas. Estructuras de hormigón y mampostería armada para reforzar y	5,63E-01	1,51E+00	1,16E+01
Acero - Malla Electrosoldada 6mm (kg)	La malla de acero de refuerzo se utiliza como dispositivo tensor en estructuras reforzadas. Estructuras de hormigón y mampostería armada para reforzar y	5,63E-01	1,51E+00	1,16E+01

Figura 5. Información consignada en la base de datos de EPDs. Fuente: Elaboración propia.

2.3 Desarrollo del plugin

Revit de Autodesk es un software de modelado que cumple con los criterios de la metodología BIM, adicionalmente permite a los programadores desarrollar aplicaciones para generar complementos (o plugins) por medio de Revit API (Application Programming Interface) usando lenguajes de programación como Visual Basic, C#, y Python. Para la presente investigación se empleó C# (pronunciado "si sharp" en inglés). Al plugin desarrollado se le dio el nombre de SIMULHE, a partir de las palabras SIMULación de Huella de carbono y Energía incorporada.

Apoyados en las herramientas BIM actuales, se desarrolló un complemento informático que permite fácil y rápidamente calcular la huella de carbono y la energía embebida en los elementos constructivos de un modelo BIM aplicando la sexta dimensión (sostenibilidad).

Los softwares BIM tienen una característica para los elementos que conforman el modelo 3D jerarquizados, como lo muestra la figura 6. Este fue el principal inconveniente, debido a que no se tenía claro en que parte de esta jerarquía anotar la información para aquellos elementos que no se disponía de datos a la mano de los EPDs.

Se presentaba un caos total al colocar la información de ciclo de vida en la jerarquía “Categoría”, puesto que puede estar compuesto por muchos materiales. Ejemplo tipo de esto es la categoría de “puerta”, ya que existen puertas de vidrio, madera, aluminio, acero, una mezcla entre ellos, con chapa, el tipo de chapa, si es de un ala, dos alas, corrediza, entre otros muchos factores.

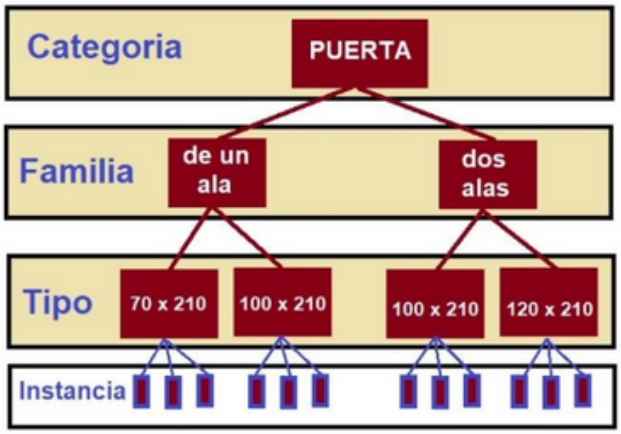

Figura 6. Jerarquía de los elementos del software BIM. Fuente: elaboración propia.

Debido a lo anterior, se decidió asociar la información del ciclo de vida a los materiales con los cuales estaba constituido el elemento. Actualmente existe una clasificación del ciclo de vida de los materiales usados en los edificios, como lo muestra la figura 7. En la presente investigación se tomó el ciclo de vida desde la cuna hasta la puerta, debido a que los proveedores llegan con sus productos hasta la obra.

Figura 7. Ciclo de vida de edificios (Campos_Cambra, 2023)

3. RESULTADOS

El plugin SIMULHE permite instalarse fácil y rápidamente en Revit v2022 como un complemento, como se puede apreciar en la

Los artículos completos serán revisados por el Comité Editorial de la revista CONSTRUCCION Y SOSTENIBILIDAD, en su cuarta edición, Se evaluará la innovación, relevancia, estado del arte, coherencia de títulos y desarrollo del cuerpo del artículo, así como el formato utilizado en esta plantilla.

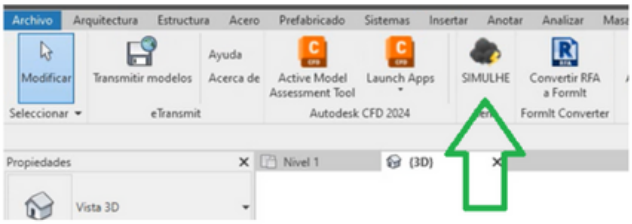

Figura 8. Plugin de SIMULHE instalado en Revit v2022

Dado que no todos los materiales permiten medirse bajo un mismo parámetro, el plugin permite calcular la huella de carbono y la energía incorporada de un material teniendo en cuenta:

- Volumen (m3), por ejemplo, arena
- Área (m2), por ejemplo, láminas de madera
- Longitud (m), por ejemplo, las tuberías o perfiles de aluminio
- Producto (unidades), por ejemplo, una lámpara, un escritorio.

Adicionalmente permite a cada uno de los materiales asociarle los valores de huella de carbono del transporte para llevarlos hasta la obra del edificio. El plugin incluye transporte aéreo, terrestre y fluvial. Esto dependerá de la ubicación del proveedor y la obra, y la topografía del terreno. Estas características se muestran en la figura 9.
El plugin se creó para ser operado de dos formas diferentes: la primera consiste en modelar un proyecto desde cero, y la segunda con un proyecto ya modelado.

También permite ver de forma alámbrica el material que se tiene dentro del mismo, por ejemplo, la figura 10 muestra que en el plugin se tiene resaltado la categoría cubierta, y en Revit, aparece de forma alámbrica la cubierta con los datos asociados de los valores totales de la huella de carbono y la energía total incorporada.

El plugin también permite crear datos para materiales que no estén incluidos en la base de datos, tanto monomaterial (un solo material) o multimaterial (varios materiales). Un ejemplo de este último podría ser un concreto especial, con una unidad de medida volumétrica (m3) que contiene:

- Cemento 20%
- Arena de concreto 40%
- Triturado 20%
- Agua 10%
- Total 100%

Obviamente los materiales incluidos en la lista anterior deberán tener sus datos en la base de datos del plugin. La figura 11 muestra este proceso.
Una ventaja muy importante es que, teniendo un material con dos proveedores diferentes, se puede evaluar la generación de gases de efecto invernadero de cada uno y, con base en esta información, tomar la decisión de compra de acuerdo con la relación precio/beneficio.

Figura 9. Unidades de medición de ciclo de vida de los materiales.

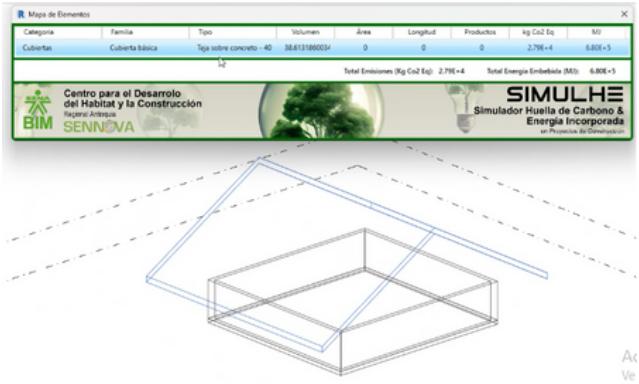

Figura 10. Forma inalámbrica de la cubierta mientras se resalta su categoría en SIMULHE.

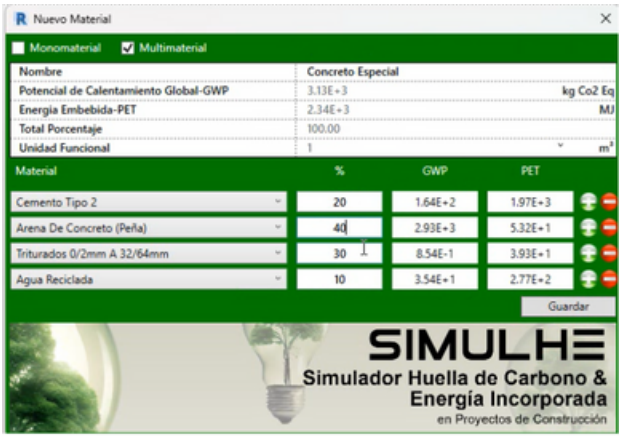

Figura 11. Ejemplo de diseño de un nuevo multimaterial de concreto

4. CONCLUSIONES

De acuerdo con la literatura consultada inicialmente, no se encontró ningún software BIM de modelado de edificios que calcule la huella de carbono y la energía embebida del modelo, mínimo usan dos softwares diferentes. En la presente investigación, el plugin desarrollado dentro del entorno Revit, no solo permite eso, sino que también ofrece la posibilidad de adicionar información de ciclo de vida de nuevos materiales, incluyendo el transporte de cada uno de ellos hasta la puerta de la obra. Otra ventaja es que no se tiene que comprar un software adicional, lo que ahorra costos.

Esto permite.

• Cálculo del ciclo de vida de los materiales del edificio mientras se modela

• Evaluación de impacto ambiental de un edificio.

• Reducción de emisiones de carbono al poder seleccionar materiales con un menor impacto ambiental.

• Uso eficiente de recursos.

• Ahorro de costos a largo plazo.

• Cumplimiento normativo ambiental.

• Se pueden obtener certificaciones de sostenibilidad.

• Se está contribuyendo a los objetivos globales de desarrollo sostenible.

• Tradicionalmente, estos cálculos han sido complejos, tediosos y, en muchos casos, inaccesibles para los profesionales del sector debido a la falta de herramientas especializadas y de fácil uso. Sin embargo, los avances tecnológicos han permitido el desarrollo de este plugin que simplifica este proceso, brindando a los arquitectos, ingenieros y gestores de proyectos las herramientas necesarias para tomar decisiones informadas que favorezcan la sostenibilidad. Este tipo de herramienta no solo facilita el análisis de los impactos ambientales de los proyectos desde sus etapas iniciales y de operación, sino que también permite la identificación de oportunidades para el uso eficiente de los recursos y la reducción de las emisiones a lo largo del ciclo de vida de la construcción.

• Y, algo muy importante, crear conciencia dentro del sector de la construcción para fomentar el uso de materiales más amigables con el medio ambiente.

5. RECOMENDACIONES

El software creado es una primera versión, y es susceptible de ser mejorado. Algunas recomendaciones serían:

• Crear una plantilla dentro del plugin para adicionar datos de otros materiales. Esta primera versión utiliza Excel para almacenar datos.

• Incluir elementos MEP (Mechanical Electrical and Plumbing).

• Incluir variables adicionales que sean relevantes para el ciclo de vida del producto.

• Soportar modelos vinculados. La versión actual de SIMULHE calcula sobre el modelo central.

Referentes Bibliográficos

AENOR. (2024). Declaraciones ambientales de productos para edificación. AENOR. https://www.aenor.com/certificacion/certificacion-de-producto/declaraciones-ambientales-de-producto/productos-para-edificacion

Alwan, Z., & Jones, P. (2014). The importance of embodied energy in carbon footprint assessment. Structural Survey, 32(1), 49–60. https://doi.org/10.1108/SS-01-2013-0012

ANDI. (2022). La construcción será protagonista en el crecimiento económico de 2022. ANDI. https://www.andi.com.co/Home/Noticia/17185-la-construccion-sera-protagonista-en-el#:~:text="El sector del acero ha,edificaciones creció 11%2C6%25

Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Camacol, & One Planet built with care. (2018). Implementación de la Política Pública de Construcción Sostenible (primera ed). Tonos Gráficos.

Autodesk. (2016). Emisiones de carbono anuales. Autodesk Revit 2016. https://help.autodesk.com/view/RVT/2016/ESP/?guid=GUID-5ABAE8B3-6660-44F7-8619-4647C22F86A7

Biswas, W. K. (2014). Carbon footprint and embodied energy assessment of a civil works program in a residential estate of Western Australia. International Journal of Life Cycle Assessment, 19(4), 732–744. https://doi.org/10.1007/s11367-013-0681-2

Campos_Cambra, A. (2023). Análisis del Ciclo de Vida (ACV) de edificios: qué es y cómo calcularlo. ZeroConsulting. https://blog.zeroconsulting.com/análisis-ciclo-vida

Crippa, J., Araujo, A. M. F., Bem, D., Ugaya, C. M. L., & Scheer, S. (2020). A systematic review of BIM usage for life cycle impact assessment. Built Environment Project and Asset Management, 10(4), 603–618. https://doi.org/10.1108/BEPAM-03-2019-0028

de Araujo, A. F., de Proença Franco, M. S., Bezerra, C. G., Caldas, L. R., Hasparyk, N. P., & Toledo Filho, R. D. (2023). Whole Life Carbon (WLC) Assessment of Building Envelope with Bamboo Bio-Concrete Simulated in Tropical and Subtropical Climates. In RILEM Bookseries (Vol. 45, pp. 1000–1011). https://doi.org/10.1007/978-3-031-33465-8_77

Filimonau, V., Rosa, M. S., Franca, L. S., Creus, A. C., Ribeiro, G. M., Molnarova, J., Piumatti, R. G., Valsasina, L., & Safaei, A. (2021). Environmental and carbon footprint of tourist accommodation: A comparative study of popular hotel categories in Brazil and Peru. Journal of Cleaner Production, 328. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129561

García, C., Barrera, X., Gómez, R., & Suárez, R. (2015). El ABC de los compromisos de Colombia para la COP21 (segunda ei). WWF-Colombia.

Ibañez, S., MSI, & Autodesk. (2021). Aplicación de cálculo de huella de carbono en un modelo BIM. Parte I. MSI Digital Builders. https://msistudio.com/aplicacion-de-calculo-de-huella-de-carbono-en-un-modelo-bim-parte-i/

Kouhirostamkolaei, M., Kouhirostami, M., Fenner, A. E., & Murphy, S. R. (2023). Calculating the Embodied and Operational Carbon Footprint in Concrete Buildings: A Case Study Simulation to Mitigate Carbon Footprint. ASCE Inspire 2023: Infrastructure Innovation and Adaptation for a Sustainable and Resilient World - Selected Papers from ASCE Inspire 2023, 1008–1017. https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85179855229&partnerID=40&md5=ccf14391e56c0a6e989477f83316940a

Mazelli, R., Bohn, A., Zea Escamilla, E., Habert, G., & Bocco, A. (2023). Comparative Life Cycle Assessment of Two "Vegetarian

Architecture" Pavilions. In RILEM Bookseries (Vol. 45, pp. 982–999). https://doi.org/10.1007/978-3-031-33465-8_76

Naciones Unidas. (2023). COP26: Juntos por el planeta. Acción Por El Clima. https://www.un.org/es/climatechange/cop26

ONU. (2015). La Asamblea General adopta la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Objetivos de Desarrollo Sostenible. https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/

Pardo, N. S., Penagos, G. L., & Acevedo, H. (2022). Environmental impacts associated with the carbon footprint and embodied energy of life cycle of a building in Medellín. Informes de La Construccion, 74(565). https://doi.org/10.3989/ic.82758

Rodríguez, L., Martínez, L., Panameño, R., París, O., Muros, A., Rodríguez, R., Javier, R., & González, C. (2023). LCA of the NZEB El Salvador building, a model to estimate the carbon footprint in a tropical country.

Journal of Cleaner Production, 408. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137137

Shadram, F., Johansson, T., Lu, W., & Olofsson, T. (2015). An Integrated BIM-Based Framework for the Energy Assessment of Building Upstream Flow. ICCREM 2015 - Environment and the Sustainable Building - Proceedings of the 2015 International Conference on Construction and Real Estate Management, 107–118. https://doi.org/10.1061/9780784479377.013

Sharma, A., Saxena, A., Sethi, M., Shree, V., & Varun. (2011). Life cycle assessment of buildings: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15(1), 871–875. https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.008

Tapper, C. S. F., & Dokka, T. H. (2019). Powerhouse Telemark: A plus energy building with a low exergy heating and cooling system. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 352(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/352/1/012056

The Internaional EPD System. (2023). The International EPD System. EPD. https://www.environdec.com/home