

- ▲ **Palabras clave/** Análisis de ciclo de vida (ACV), BIM, *cradle to cradle* (C2C), familias BIM.
- ▲ **Keywords/** Life cycle analysis (LCA), BIM, *cradle to cradle* (C2C), BIM families.
- ▲ **Recepción/** 26 de abril 2021
- ▲ **Aceptación/** 20 de julio 2021

Arquitectura sostenible y eco-efectiva: ampliando los límites del BIM con una aproximación *cradle to cradle*

Sustainable and Eco-Effective Architecture: Pushing BIM Limits with a Cradle-to-Cradle Approach

Mónica Val Fiel

Arquitecta, Universitat Politècnica de Valencia, España.
Licenciada en Bellas Artes, Universitat Politècnica de Valencia, España.
Doctora por la Universitat Politècnica de Valencia, España.
Profesora en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño, Universitat Politècnica de Valencia, Valencia, España.
movalfie@ega.upv.es

RESUMEN/ El estudio del uso circular de los materiales junto con el potencial de los procesos paramétricos en las primeras etapas del diseño, erige a los nuevos sistemas de Modelado de Información para la Construcción (BIM, por sus siglas en inglés) como las herramientas perfectas en la definición de una arquitectura eco-efectiva y sostenible, integrando los principios del paradigma *cradle to cradle* (C2C) en la industria de la construcción. La implementación de las tecnologías BIM permite incorporar toda la información necesaria para el desarrollo del proyecto. El objetivo de la investigación es promover la integración de la certificación C2C con las herramientas BIM para la creación de librerías de productos (familias en BIM) o bases de datos que permitan evaluar los beneficios y cargas de los productos más allá del ciclo de vida del edificio. **ABSTRACT/** The study of the circular use of materials together with the potential of parametric processes in the early stages of design, positions the new Building Information Modeling (BIM) systems as the perfect tool in the definition of an eco-effective and sustainable architecture, integrating the principles of the *cradle to cradle* (C2C) paradigm into the construction industry. Through the implementation of BIM technologies, all the information required for project development can be introduced. This research is aimed at promoting the integration of C2C certification with BIM tools for the creation of product libraries (families in BIM) or databases to assess the benefits and burdens of products beyond a building's life cycle.

INTRODUCCIÓN

La preocupación por el medio ambiente se ha convertido en una cuestión de vital importancia. El planeta necesita con urgencia un cambio de sensibilidades, comportamientos y, muy especialmente, de los modos globalizados e insostenibles de producción y consumo. El actual modelo de extracción, producción y disposición de desechos está llegando al límite de su capacidad.

Con un desarrollo de capital económico, natural y social -respaldado por una transición hacia energías renovables- la economía circular

se basa en tres principios: eliminar residuos desde el ámbito del diseño, mantener los productos y materiales en uso y regenerar los sistemas naturales (Ellen MacArthur Foundation 2019).

ANTECEDENTES CRADLE TO CRADLE

En el campo del diseño y con la idea de cerrar los ciclos de energía y materiales, estrategias sostenibles como la de *cradle to cradle* (C2C) proponen rediseñar los procesos de producción. Esta estrategia se enmarca dentro de los modelos de una economía

circular como alternativa al sistema lineal de extraer, producir y desechar.

El diseño convencional se desarrolla en un rango *cradle to grave* (de la cuna a la tumba) y tiene como objetivo el uso de cada producto por un único período, tras el cual sus materiales son desechados. Sin embargo, las teorías C2C proponen que el diseño y la fabricación de los productos debe considerar el uso, el reciclaje y un nuevo uso, sin sacrificar la calidad estética o el material y contribuyendo a la sostenibilidad del planeta.

Tomando la naturaleza como fuente de inspiración, McDonough y Braungart recogen los primeros esfuerzos destinados a rediseñar los procesos actuales de producción industrial, haciendo un llamamiento a respetar las leyes de la naturaleza como imperativo ecológico y reconociendo en sus sistemas "una inteligencia mucho más allá de nuestra limitada capacidad de comprensión" (McDonough y Braungart 2002, p. xvii).

El modelo C2C considera y distingue dos ciclos, el tecnológico y el biológico, indicando que "los productos pueden estar compuestos por materiales que serán biodegradables y que se convertirán en alimento a lo largo de ciclos biológicos, o por materiales técnicos que no salen de los bucles de los ciclos técnicos, a través de los cuales circulan indefinidamente como nutrientes singulares para la industria" (McDonough y Braungart 2002, p. 99). La idea principal es potenciar una nueva forma de diseñar, para lo que los autores destacan tres principios. El primer de ellos es que los desechos puedan ser reincorporados a los procesos productivos y se conviertan en alimento para otros. En segundo lugar, se potencia el uso de energías renovables y se usan energías naturales que están a nuestra disposición, sin recurrir a energías contaminantes. El tercer principio apunta a valorar la diversidad de la naturaleza y sacar provecho de ella (op. cit.).

Tras el desarrollo de las teorías *cradle to cradle*, en 1995, McDonough y Braungart fundaron la firma *McDonough Braungart Design Chemistry* MBDC. Diez años después, la empresa desarrolló el programa de productos *Cradle to Cradle Certified™* como vía transformadora para diseñar y fabricar productos con un impacto positivo sobre las personas y el planeta. Poco después, en 2010, se creó el *The Cradle to Cradle Products Innovation Institute* como organización sin ánimo de lucro para la gestión de los certificados.

La marca de certificación C2C es un etiquetado multiatributo que evalúa si un producto es óptimo para la salud humana y ambiental, revisando sus componentes químicos. Para

certificar un producto, se examina su función ambiental y social en relación con cinco categorías asociadas con los materiales, la economía, la energía, el agua y la vida. En su versión más reciente, estas son: salud material, circularidad del producto, aire limpio y clima, administración del agua y suelo, y equidad social. En cada categoría del producto se obtiene un reconocimiento con las valoraciones de Básico, Bronce, Plata, Oro y Platino (figura 1).

La certificación incentiva la mejora continua en la escala para cada producto. En edificaciones, la marca certifica que el proyecto está ejecutado con materiales C2C, con empresas y consultores certificados o, en su conjunto, inspirado en la certificación C2C (*Cradle to Cradle Products Innovation Institute* 2021). La certificación se encuentra en constante mejora y evolución, siendo su última versión la 4.0, vigente desde julio de

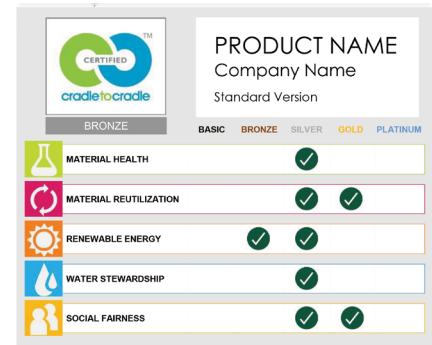


Figura 1. Ejemplo de certificado de un producto (fuente: C2CCertified_ProductStandard_V3.1, 2013).

2021, con un período de transición de un año para la versión anterior 3.1. La tabla 1 recoge las nuevas categorías etiquetadas.

CRADLE TO CRADLE CERTIFIED PRODUCT STANDARD VERSION 4.0	
CATEGORÍA	INTENCIÓN DE LA CATEGORÍA
Requisitos de salud de los materiales	Los productos químicos y materiales utilizados en el producto se seleccionan para priorizar la protección de la salud humana y el medio ambiente, generando un impacto positivo en la calidad de los materiales disponibles para uso futuro y reutilización.
Requisitos de circularidad del producto	Los productos están diseñados intencionadamente para su próximo uso y son conducidos activamente por sus ciclos previstos.
Requisitos de protección del aire limpio y el clima	La fabricación de productos tiene un impacto positivo en la calidad del aire, el suministro de energía renovable y el equilibrio de los gases de efecto invernadero.
Requisitos de administración del agua y el suelo	El agua y el suelo son tratados como recursos preciosos y compartidos. Las cuencas hidrográficas y los ecosistemas del suelo están protegidos, y el agua limpia y los suelos sanos están disponibles para las personas y todos los demás organismos.
Requisitos de equidad social	Las empresas están comprometidas con la defensa de los derechos humanos y la aplicación de prácticas de comercio justo y equitativo.

Tabla 1. Categorías Cradle to Cradle Product Standard Version 4.0 (fuente: Elaboración propia en base a Cradle to Cradle Certified Product Standard Version 4.0 User Guidance, 2021).

ANTECEDENTES DEL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA

El análisis del ciclo de vida (ACV, conocido también por sus siglas en inglés LCA, *Life Cycle Assessment*), habitual en la industria del producto, es una herramienta que permite evaluar el impacto ambiental de los productos -tanto manufacturados como consumidos- mediante el estudio de los recursos utilizados y de las emisiones ambientales que se producen a lo largo de su ciclo de vida. Esto incluye desde la extracción de la materia prima pasando por la producción, la utilización y el tratamiento final, hasta su disposición definitiva. El ACV se divide en cuatro fases de estudio: definición del objetivo y alcance, análisis del inventario, evaluación del impacto ambiental e investigación (ISO14044:2006). Tal como desarrolla el marco normativo, este análisis permite identificar las oportunidades para mejorar el desempeño ambiental de los productos en las distintas etapas de su ciclo de vida y ofrece información para su planificación estratégica, estableciendo prioridades y el diseño y rediseño de los productos y el proceso. Además, ayuda a la selección de indicadores ambientales correspondientes, incluyendo la medición y el marketing, por ejemplo un etiquetado ambiental que elabore una declaración ambiental del producto (ISO14044:2006). En el ámbito de la arquitectura, a objeto de potenciar la construcción sostenible, destacan certificaciones como LEED, de origen estadounidense, y BREEAM, de origen británico, que evalúan la eficiencia de la arquitectura y garantizan que la construcción de un edificio siga estándares de ecoeficiencia y sostenibilidad. También en este contexto, el ACV ha adquirido protagonismo a la hora de definir un método de análisis del impacto ambiental de la construcción (Singh 2011). En esa línea, el objetivo de este análisis es optimizar los recursos y cuantificar el impacto negativo de la construcción con el fin de minimizar su repercusión sobre el medio. En la actualidad, las certificaciones y normas que persiguen la eficiencia del sistema arquitectónico y la gestión del ciclo de

vida de sus activos no son mecanismos que determinen un rango de obligado cumplimiento, por lo que sigue faltando la implementación de medidas correctivas que aborden estos planteamientos con determinación. En lo referente a la normativa (ISO 14040/14044), por una parte, el análisis del ciclo de vida regulado por estándares ISO se ha hecho extensivo a la construcción. En el caso de las edificaciones, en la norma 15804 y 15978 se establecen los principios generales para la construcción de edificios, obras de ingeniería civil y otros tipos de obras, aplicados a materiales, productos, servicios y procesos relacionados con su ciclo de vida. Además, en relación con las nuevas herramientas paramétricas, la actual publicación de la norma ISO 19650:2019 (figura 2) desarrolla la definición de un marco de gestión para facilitar los procesos de diseño, construcción y operación. El objeto de aplicación de la norma abarca todo el ciclo de vida de cualquier activo construido, incluyendo planificación estratégica, diseño inicial, ingeniería, desarrollo, documentación, construcción, operaciones diarias, mantenimiento, rehabilitación, reparación y final de vida útil. La actual legislación relacionada con el ACV determina su análisis hasta el final de la vida



Figura 2. Ciclo de vida de la gestión de la información de los proyectos y activos según EN19650:2019 (fuente: Elaboración propia, 2021).

útil (etapa C), pero define un módulo adicional de información complementaria (módulo D) que denomina “beneficios y cargas más allá del límite del sistema” (figura 3). La evaluación de esta etapa propone incluir la evaluación de los impactos y beneficios vinculados con el potencial de las 3R de los residuos de construcción y demolición (RCD, conocido también en inglés como CDW, *Construction and Demolition Waste*) y otros. “El módulo de información D busca

INFORMACIÓN DEL CICLO DE VIDA DEL EDIFICIO																INFORMACIÓN ADICIONAL MÁS ALLÁ DEL CICLO DE VIDA DEL EDIFICIO
Etapa de producto			Etapa de proceso de construcción		Etapa de uso					Etapa de fin de vida				Beneficios y cargas más allá del límite del sistema		
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	C1	C2	C3	C4	D		
Suministro de materia prima	Transporte	Fabricación	Transporte	Etapa de proceso de construcción edilicia	Uso	Mantenimiento	Reparación	Substitución	Rehabilitación	Demolición, demolición	Transporte	Tratamiento de residuos	Eliminación de residuos	Potencial de reutilización, recuperación y reciclaje		
					B6 Uso de energía en servicio											
					B7 Uso de agua en servicio											

Figura 3. Etapas del ciclo de vida y módulos para la evaluación de edificios según el estándar UNE-EN 15804 (fuente: Elaboración propia, 2021).

la transparencia de los beneficios o cargas ambientales generados por los productos reutilizables, materiales reciclables y/o vectores energéticos útiles procedentes del sistema del producto, por ejemplo, en forma de materiales o combustibles secundarios” (UNE-EN 15804:2012+A1:2013, p.27).

En relación con los RCD, el sector de la construcción está evolucionando hacia criterios de sostenibilidad como lo demuestran las investigaciones de Mulder (2007). Wu (2019) ofrece, a través de un a revisión crítica, una referencia útil como punto de partida para la investigación desde los distintos ámbitos que participan en su definición. La continua actualización de nuevas legislaciones, por ejemplo las directrices europeas (Shane *et al.* 2021), generan también expectativas favorables en este sector. Investigaciones como las que lidera la *Ellen MacArthur Foundation* (2019), junto con *Material Economics*, demuestran cómo la aplicación de estrategias de un escenario circular para el entorno construido en las áreas -cemento, aluminio, acero y plástico- podría reducir las emisiones de CO₂ en 38% en 2050 (o en 56% más allá de 2050).

Con todo ello, las normativas recientes hacen extensivos a la edificación los análisis del ciclo de vida de los productos. Sin embargo, la no obligatoriedad de los planteamientos de una economía circular deja la consideración de sus preceptos a elección de los agentes participantes en el proceso, como gobiernos e industrias, junto con profesionales y consumidores. Aunque las acciones desde la base (*bottom-up*) están limitadas por las políticas y las regulaciones de cada país, es necesario que se potencien como complemento por parte de las instituciones para incentivar la educación, la información y la conciencia (desarrollo del conocimiento), los esquemas de apoyo empresarial, las plataformas de colaboración, la contratación pública y las infraestructuras, los marcos regulatorios

y los marcos fiscales, que incentiven una conciencia circular entre los usuarios finales, los profesionales y los gestores (Prendeville 2018).

OBJETIVO

En este contexto y en plena expansión de las herramientas BIM, el objetivo que se persigue es evidenciar que las nuevas herramientas son sistemas potenciales idóneos para la traslación del paradigma C2C a la arquitectura. La idea es promover la evolución de los avances de estas herramientas BIM en la integración de la perspectiva C2C para la evaluación del impacto ambiental de la edificación mediante la integración de la información eco-efectiva de los productos en las librerías de familias de los sistemas BIM.

RESULTADOS

La traslación de los principios C2C al urbanismo y a la arquitectura no solo implica optimizar el rendimiento de las instalaciones, por ejemplo, para evitar el gasto de aire acondicionado e iluminación mediante la colocación de paneles fotovoltaicos e instalaciones eficaces, sino también concebir el problema desde el inicio y diseñar la edificación de manera que se aproveche la iluminación natural y la ventilación cruzada. McDonough y Braungart incentivan la aplicación de las leyes de la naturaleza y la concepción del edificio como una “hoja humana”, de manera que el sol sea parte de su metabolismo. En la medida en que los arquitectos y los urbanistas adopten estos principios con una nueva concepción del diseño, surgirán referencias novedosas que se irán retroalimentando y, cada vez, serán más expertos en la creación de espacios adecuados para los asentamientos humanos. Los autores manifiestan que “en lugar de dominar la naturaleza o limitar el impacto humano, el buen diseño afirmará la posibilidad de desarrollar relaciones saludables y creativamente interactivas

entre los asentamientos humanos y el mundo natural”¹ (2002b).

Los autores alientan a que se empiece por una investigación de la historia natural y cultural de cada región, evaluando los sistemas naturales, la hidrología, la vegetación, el clima y los accidentes geográficos; e investigando las fuentes locales de energía, los ciclos de luz, de sombra y de agua, además de la arquitectura vernácula de la región. Así, los arquitectos obtendrán de sus investigaciones los patrones apropiados para el desarrollo de cada paisaje. Los materiales de construcción se seleccionarán con el mismo cuidado, después de un estudio minucioso de sus características químicas y del impacto de su uso y fabricación. Por otra parte, fomentan la creación de un sistema de reciclaje de circuito cerrado en la industria de la construcción para administrar de manera efectiva el flujo de materiales. Con ello se establece la traslación de los tres principios *cradle to cradle* a la arquitectura:

- i) Los desechos se convierten en alimento de segundos procesos. De ese modo, los materiales y sistemas constructivos se deben diseñar eliminando el concepto de desperdicio, del mismo modo en que las bacterias y los hongos se alimentan de los desechos orgánicos tanto del árbol como de los animales que comen sus frutos, depositando así nutrientes en el suelo de manera que son reabsorbidos por el árbol y contribuyen a su crecimiento. Este principio potencia la idea de que los materiales deben ser diseñados para su uso en ciclos “de la cuna a la cuna” y pueden ser reutilizados como materiales para nuevos productos.
- ii) Incentivo de energías renovables. Tal como los seres vivos prosperan con la energía del sol, se propone que los edificios también lo aprovechen mediante procesos de recolección

1 Traducción del autor.

solar activos o pasivos o bien mediante energía eólica obtenida por flujos térmicos.

iii) Adaptación eficaz de edificios y ciudades al entorno local mediante la aplicación de gran diversidad de soluciones por parte de arquitectos y planificadores, tal como sucede con la fotosíntesis y el ciclo de nutrientes que producen una sorprendente diversidad de formas.

La incorporación de las metodologías BIM implica la transformación de las herramientas de CAD tradicionales y abarca las fases de diseño, construcción y mantenimiento de los edificios. Además, los modelos BIM incorporan las dimensiones adicionales de tiempo (4D), coste (5D), sostenibilidad (6D) y ciclo de vida (7D) de los proyectos. La sexta dimensión relativa a la sostenibilidad recoge todos los aspectos que afectan el comportamiento energético del edificio, certificaciones o gestión de recursos, mientras que la séptima y última dimensión recoge todos aquellos correspondientes al ciclo de vida del edificio, su mantenimiento y cambios de uso, entre otros.

Las herramientas BIM introducen en el campo de la arquitectura los procesos paramétricos y hacen posible la readaptación del modelo arquitectónico mediante la interacción de sus parámetros. En el modelado paramétrico, la geometría se asocia con parámetros que se ordenan bajo un conjunto de reglas, relaciones y restricciones. Con la modificación de los parámetros y de las reglas que los vinculan, se evidencian en tiempo real los cambios en el modelo y cómo varía su respuesta frente a los factores medioambientales. La cuantificación de estos factores y la evaluación de su impacto sobre las diferentes alternativas de proyecto permiten dar una mejor respuesta al medio físico. Así, se incorporan en el diseño cuestiones como la orientación y la volumetría de la arquitectura, destacando los condicionantes de ventilación, soleamiento y optimización de la envolvente (Krygiel y Nies 2008).

Como ejemplo, “la incorporación de los factores de la radiación incidente sobre la envolvente del edificio permite la toma de

decisiones referentes al diseño de elementos de captación, en relación a la dimensión de la apertura de huecos. El programa ajusta automáticamente las aperturas circulares en los paneles en función del ángulo de incidencia de la radiación solar. Se establece una vinculación entre el ángulo de incidencia del sol y la normal de cada uno de los paneles, de manera que fijando la posición del sol para una hora o fecha distinta se traducirá en un cambio en la apertura de los huecos de la envolvente, siendo la apertura mayor cuanto menor sea la radiación recibida. Asimismo, cualquier variación en la forma o volumen producirá la readaptación de los huecos a las nuevas condiciones de radiación solar.

de confort deseados” (Val y Beteta 2014) (figura 4).

Las herramientas BIM se erigen como potenciales para dar respuesta a estrategias sostenibles como la de *cradle to cradle* en el ámbito de la arquitectura. Estas herramientas permiten concebir, desde el inicio del proyecto y como condicionantes de diseño, cuestiones como la iluminación natural y la ventilación de las edificaciones, a la vez que persiguen eficiencia energética y posibilitan tomar decisiones en relación con el volumen, la orientación y la forma de las edificaciones.

DISCUSIÓN

En el ámbito de la edificación, el ACV es una herramienta que permite medir la

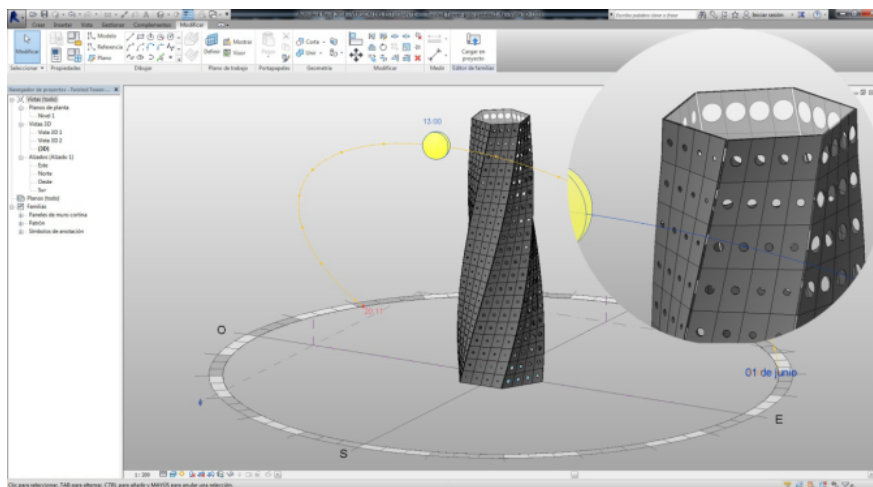


Figura 4. Modelo conceptual donde las aperturas de la envolvente varían en función de su orientación. La geometría está definida en el software Dynamo en su totalidad (fuente: Val y Beteta, 2014, Integración del Diseño Paramétrico Vinculado a la Fabricación Digital en los Modelos BIM).

El ejemplo muestra la variación de un único parámetro, la apertura del hueco en los paneles, y no se pretende que las aperturas den respuesta al conjunto de estadios de soleamiento, sino por ejemplo, analizar con las condiciones reales, variaciones de forma que den respuesta a los requerimientos

influencia del sistema sobre el entorno. Con la implementación de las tecnologías BIM se puede incorporar toda la información necesaria para el desarrollo del proyecto y, mediante la integración de estos análisis, se dispone de información ecoeficiente de productos y materiales para la toma de decisiones en el proceso de diseño.

Por su parte, las nuevas herramientas BIM permiten realizar estudios de impacto ambiental con la incorporación de aplicaciones auxiliares. Sin embargo, la integración completa se encuentra en fase de evolución e investigación. Mientras algunas investigaciones centran sus esfuerzos en mejorar la integración, otras, por problemas derivados de la interoperabilidad o la edición de bases de datos, se dirigen a la creación de herramientas personalizadas para la integración automática BIM y ACV (Santos 2020).

Dalla (2018) analiza y compara el ciclo de vida completo del proceso de diseño, fabricación, mantenimiento y sustitución de material con la integración de los complementos *Tally®* y *One Click LCA™* disponibles para Autodesk® Revit®. El autor identifica las diferencias que presentan los procedimientos y determina variaciones de alrededor del 10% en cuanto al potencial de calentamiento global (*Global-Warming Potential* o GWP, según su sigla en inglés) y del 22% por el uso de bases de datos distintas, por no disponer de los mismos productos. Atik (2021), comparando el enfoque de ACV integrado en BIM con eToolLCD y un estudio de ACV tradicional, destacó variaciones alrededor del 8% en el GWP.

Investigaciones como las de Bjørn y Hauschild (2011, 2018) revelan los conflictos entre C2C y ACV; sin embargo, plantean que pueden complementarse y proporcionar orientación para un diseño sostenible. Las estrategias ecoeficientes -como las utilizadas para el ACV- buscan minimizar el impacto negativo sobre el sistema, el volumen de los recursos, la toxicidad, etc. Sin embargo, frente a este planteamiento de minimización y desmaterialización, el enfoque de C2C es cualitativo: los valores y los principios van antes que los parámetros cuantitativos (Bjørn y Hauschild 2018).

Wastiels (2013) defiende la relevancia y el proceso para incluir el módulo D en la evaluación del ciclo de vida de los edificios que contienen gran cantidad de metales, pero no lo hace extensivo al conjunto de edificaciones. En investigaciones posteriores

(Wastiels 2019), determina los posibles flujos de trabajo para la integración de ACV y BIM basada en la evaluación de las herramientas existentes. Las investigaciones estudian las ventajas e inconvenientes dependiendo de la fase de diseño y de los datos disponibles. Investigaciones recientes, como la de Llatas (2020), plantean una metodología de referencia para el proceso de diseño. En este sentido, la configuración de un proceso que evidencie la repercusión en las primeras etapas de la fase de diseño es significativa para reducir el impacto de los edificios a lo largo de su ciclo de vida.

En el campo exclusivo de la edificación, las certificaciones como LEED y BREEAM reconocen en su baremo la certificación *Cradle to Cradle Certified™*. Por una parte, la integración de la certificación C2C con los estándares de sostenibilidad para las edificaciones permite medir el grado de sostenibilidad ambiental de las edificaciones junto con el de los productos y su posible uso futuro.

Por todo ello, se concibe que la consideración de la certificación C2C para la creación de

librerías de productos (familias en BIM) (figura 5) o bases de datos con información integrada permitiría automatizar simulaciones a fin de que, en fases iniciales del diseño, se pueda evaluar el impacto ambiental y tomar decisiones en consecuencia, abriendo con ello una línea de investigación.

La estrategia C2C persigue aumentar los impactos positivos frente a la reducción de impactos negativos que persigue el ACV. La incorporación de la certificación C2C en un enfoque integrado con las herramientas BIM haría posible ir más allá en las evaluaciones de la "cuna a la tumba" del actual análisis ACV, permitiendo considerar los beneficios que los productos pueden proporcionar más allá de su primer uso, incluyendo con ello las etapas de reciclaje, recuperación y reutilización (figura 6) que considera el módulo D.

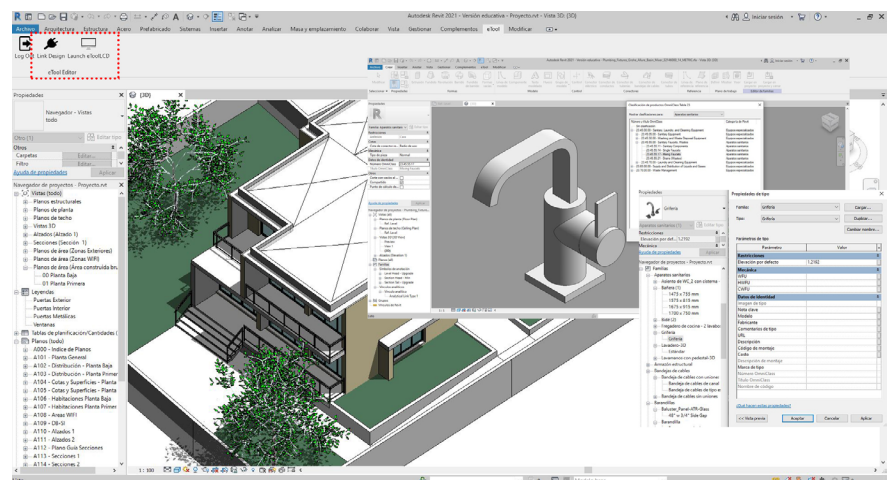


Figura 5. Integración de eToolLCD con Autodesk Revit. Vivienda unifamiliar modelada con Autodesk Revit, software BIM. Interface del editor de proyecto, editor de familias y cuadro de propiedades del tipo grifería Grohe (fuente: Elaboración propia, 2021).

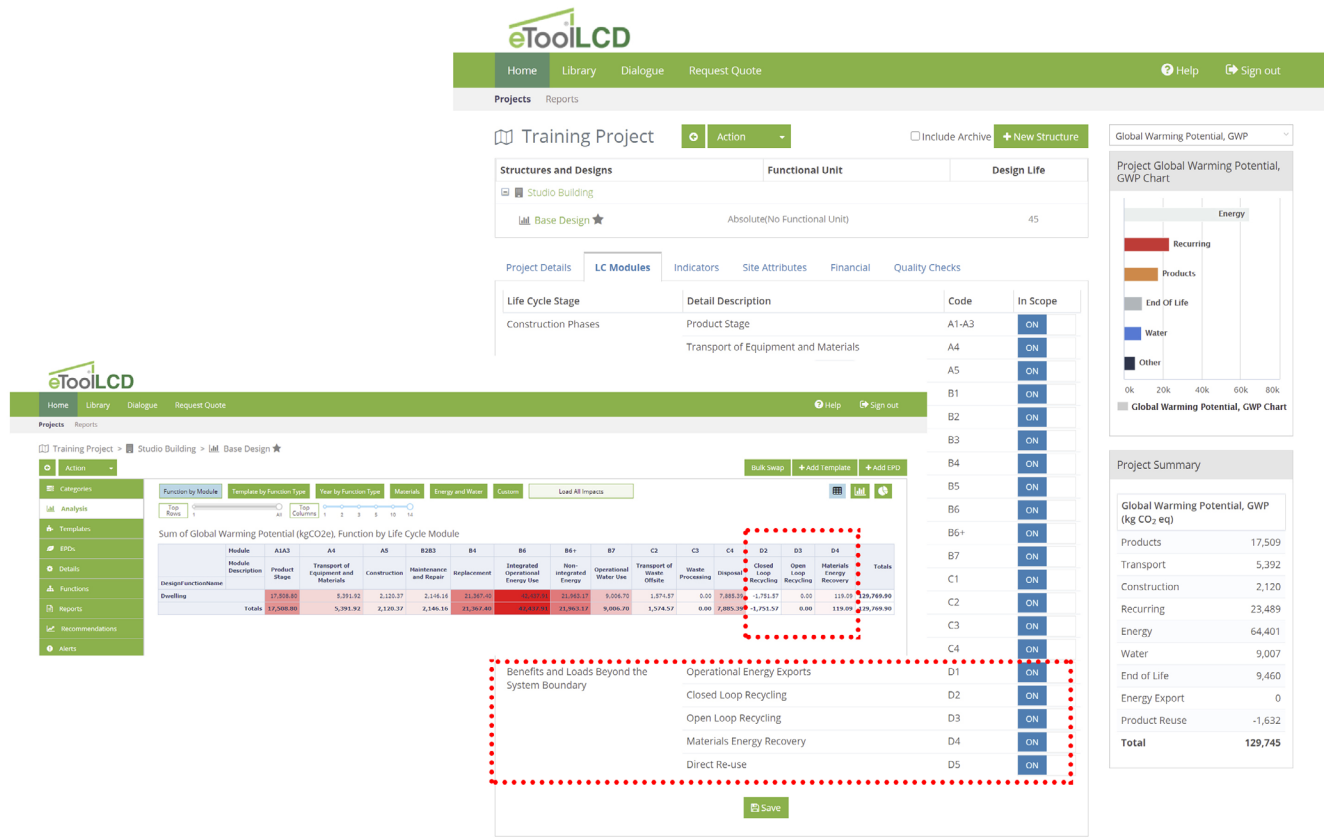


Figura 6. Interfaz del proyecto de entrenamiento de la aplicación eToolLCD (software libre). El interfaz muestra el módulo D incluido en el análisis del ciclo de vida (fuente: Elaboración propia, 2021).

CONCLUSIONES

Las herramientas BIM incorporan la capa de datos junto con la documentación gráfica y permiten disponer de la información que afecta a los edificios más allá de su ciclo de vida. La integración de la información medioambiental facilita promover una evaluación automática en todo el proceso de diseño. Incluir la información ecoefectiva de los productos, junto con los condicionantes climáticos que ya son

considerados parámetros del proceso de diseño, permitirá integrar la concepción *cradle to cradle* en arquitectura.

La integración de la certificación de los materiales C2C en las capas de información de los sistemas BIM posibilitaría, al finalizar la vida del edificio, la gestión de sus activos y lograr que los desechos de un proceso se puedan reconvertir en recursos de otro, abriendo una futura línea de investigación.

Por todo ello, las herramientas BIM se erigen como idóneas para cerrar el ciclo *cradle to cradle*. 🌱🌱

BIBLIOGRAFÍA

- Atik, S., Domenech Aparisi T. y Raslan R. (2021) "Investigating the effectiveness and robustness of performing the BIM-based cradle-to-cradle LCA at early-design stages: a case study in the UK." *International Building Performance Simulation Association (IBPSA)*.
- Bjørn, A. Hauschild M. Z. (2011) "Cradle to Cradle and LCA-is there a Conflict?." En *Globalized Solutions for Sustainability in Manufacturing*, pp. 599-604. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Bjørn, A. y Hauschild M. (2018) "Cradle to Cradle and LCA." En *Life Cycle Assessment*, pp. 605-631. Springer, Cham.
- Building Research Establishment's Environmental Assessment Method (BREEAM), acceso el 17 marzo de 2021, <https://www.bregroup.com/>
- C2C-Centre. *The Gateway for Cradle to Cradle knowledge, expertise and professionals*. Acceso el 17 marzo de 2021, <http://www.c2c-centre.com/>
- Cradle to Cradle Products, Innovation Institute*. Acceso el 17 marzo de 2021, <https://www.c2ccertified.org/>
- Dalla Mora, T. Bolzonello E., Peron F. y Carbonari A. (2018) "Integration of LCA tools in BIM toward a regenerative design." PLEA.
- Ellen MacArthur Foundation. *Toolkit for policymakers. A circular economy toolkit for policymakers providing tools and methods needed to embark on a circular economy transformation*. Acceso el 17 marzo de 2021, <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/resources/apply/toolkit-for-policymakers>.
- Ellen MacArthur Foundation (2019) *Completing the Picture: How the Circular Economy Tackles Climate Change*. V.3 26 de septiembre de 2019, acceso el 17 marzo de 2021, <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications>
- eToolLCD, acceso el 17 de agosto de 2021, <https://etoolglobal.com/>
- Krygiel, E. y Nies B. (2008) *Green BIM: successful sustainable design with building information Modelling*. John Wiley & Sons.
- Leadership in Energy and Environmental Design (LEED). U.S. Green Building Council (USGBC), acceso el 17 de marzo de 2021, <https://www.usgbc.org/leed>.
- Llatas, Carmen, Bernardette Soust-Verdaguer, and Alexander Passer. "Implementing Life Cycle Sustainability Assessment during design stages in Building Information Modelling: From systematic literature review to a methodological approach." *Building and Environment* (2020): 107164.
- Material Economics* (2018) The circular economy - a powerful force for climate mitigation. Acceso el 17 de agosto de 2021, <https://materialeconomics.com/publications/the-circular-economy>.
- McDonough, W. y Braungart M. (2002) *Cradle to cradle: Remaking the way we make things*. North Point Press.
- McDonough, W. y Braungart M (2002b) "Buildings like trees, cities like forests." *The Catalogue of the Future*. Acceso el 17 agosto de 2021, <https://mcdonough.com/writings/buildings-like-trees-cities-like-forests/>
- Mulder, E. de Jong T. PR y Feenstra L. (2007) Closed Cycle Construction: An integrated process for the separation and reuse of C&D waste. *Waste Management* 27, no. 10: 1408-1415.
- Prendeville, S., Cherim E. y Bocken N. (2018) Circular cities: Mapping six cities in transition. *Environmental innovation and societal transitions* 26: 171-194.
- Santos, R., Aguiar Costa A., Silvestre J.D., Vandenbergh T. y Pyl L. (2020) BIM-based life cycle assessment and life cycle costing of an office building in Western Europe. *Building and Environment* 169, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106568>.
- Santos R., Aguiar Costa A., Silvestre J.D. y Pyl L. (2020) Development of a BIM-based environmental and economic life cycle assessment tool. *Journal of Cleaner Production* 265. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121705>.
- Shane D., Nicholas D. y Mauro C. (2021) (JRC, Unit B.5) European Commission "Level(s) indicator 2.1: Bill of Quantities, materials and lifespans". Macro-objective 2: Resource efficient and circular material life cycles, acceso el 17 marzo de 2021, <https://susproc.jrc.ec.europa.eu/product-bureau/product-groups/412/documents>.
- Singh, A., Berghom G., Joshi S. y Syal M. (2011) Review of life-cycle assessment applications in building construction. *Journal of Architectural Engineering* 17, No. 1: 15-23.
- UNE-EN ISO 14040:2006 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia.
- UNE-EN ISO 14044:2006/A1:2008 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices. Modificación 1. (ISO 14044:2006/Amd 1:2017).
- UNE-EN 15804:2012+A2:2020 Sostenibilidad en la construcción. Declaraciones ambientales de producto. Reglas de categoría de producto básicas para productos de construcción.
- UNE-EN 15978:2012 Sostenibilidad en la construcción. Evaluación del comportamiento ambiental de los edificios. Métodos de cálculo.
- UNE-EN ISO 19650-1:2019. Organización y digitalización de la información en obras de edificación e ingeniería civil que utilizan BIM (Building Information Modelling). Gestión de la información al utilizar BIM. Parte 1: Conceptos y principios. (ISO 19650-1:2018).
- UNE-EN ISO 19650-2:2019. Organización y digitalización de la información en obras de edificación e ingeniería civil que utilizan BIM (Building Information Modelling). Gestión de la información al utilizar BIM. Parte 2: Fase de desarrollo de los activos. (ISO 19650-2:2018).
- Val, M. y Beteta, M. (2014) "Integración del Diseño Paramétrico Vinculado a la Fabricación Digital en los Modelos BIM". En: Fuentes Giner, M. y Oliver Faubel I. (ed). *EU BIM. Encuentro de usuarios BIM 2014. 2º Congreso Nacional BIM*. ISBN 978-84-9048-234-6.
- Wastiels, L., Van Dessel J. y Delem L. (2013) "Relevance of the recycling potential (module D) in building LCA: A case study on the retrofitting of a house in Seraing." En: *Proceedings of Sustainable Building Conference SB13*, Graz.
- Wastiels, L. y Decuypere R. (2019) "Identification and comparison of LCA-BIM integration strategies." En: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 323, No. 1, p. 012101. IOP Publishing.
- Wu, H. Zuo J., Zillante G., Wang J. y Yuan H. (2019) Status quo and future directions of construction and demolition waste research: A critical review. *Journal of Cleaner Production* 240: 118163.