

# **Alternativas Metodológicas de Calculadoras de Huella de Carbono**

INFORME TÉCNICO ESTADO DEL ARTE NACIONAL E  
INTERNACIONAL

## Sobre este informe

Autores: Pia Wiche Latorre (EcoEd), Bárbara Rodríguez Droguett (Universidad de Chile) y Danilo Bianchi Granato (EcoEd).

Revisores:

Norman Goijberg, Cámara Chilena de la Construcción  
Paola Valencia Marticorena, Ministerio de Vivienda y Urbanismo

Este informe fue producido en el marco de la licitación “Estado del arte nacional e internacional de alternativas metodológicas para levantamiento de datos, monitoreo, reporte y verificación y calculadoras de Huella de Carbono” y fue publicado en marzo de 2020.

Cómo citar este archivo:

Wiche, P., Rodríguez, B., Granato, D. Alternativas Metodológicas de Calculadoras de Huella de Carbono. Publicado por Instituto de la Construcción, 2020. Santiago, Chile.

Notas sobre derechos de autor y marca registrada:

Los nombres de todas las herramientas citadas son marcas registradas y de propiedad de sus respectivos dueños.

Los trabajos citados son de propiedad de sus autores.

## Contenidos

Glosario.....	3
Resumen Ejecutivo.....	6
1 Introducción.....	1
1.1 Las calculadoras de Huella de Carbono en el Proceso de Diseño .....	1
1.2 Software y Tecnologías para Diseño de Edificaciones.....	3
1.3 Metodología del Estudio .....	5
2 Aplicación a Productos .....	9
2.1 Revisión internacional.....	9
2.2 Revisión nacional .....	12
2.3 Diagnóstico del capítulo .....	14
2.4 Conclusión del capítulo.....	14
3 Aplicación a Edificación.....	15
3.1 Revisión internacional .....	15
3.2 Revisión Nacional .....	25
3.3 Diagnóstico del capítulo .....	29
3.4 Conclusión del capítulo.....	30
4 Aplicación Sectorial.....	31
4.1 Revisión internacional .....	31
4.2 Revisión nacional .....	34
4.3 Diagnóstico del capítulo .....	36
4.4 Conclusión del capítulo.....	36
5 Diagnóstico General.....	37
5.1 Identificación de brechas.....	37
5.2 Identificar metodologías más aplicables a la realidad nacional .....	37
6 Conclusión .....	39
Referencias .....	40
Anexo A: resúmenes descriptivos de calculadoras de huella de carbono en construcción .....	47

## Índice de Tablas

Tabla 1. Herramientas revisadas en este informe, por aplicación, tipo y procedencia.....	8
Tabla 2. Tipos de datos incluidos en una calculadora de declaración ambiental de productos basada en reglas por categoría de productos.....	10
Tabla 3. Ejemplo de cálculo efecto de la huella de carbono del transporte sobre el impacto incorporado del material en obra.....	12
Tabla 4. Ejemplo de acciones a realizar por un usuario durante las tres etapas de diseño en la calculadora de edificación LCADesign [23].....	16

## Índice de Figuras

Figura 1: La importancia de las decisiones, la incertidumbre y el impacto ambiental durante las etapas del proceso de diseño arquitectónico [5].....	1
Figura 2. Descripción gráfica de una calculadora. Reproducción en base a [5].....	2
Figura 3: Ejemplos de softwares usados en las distintas etapas de un proyecto de construcción. Elaboración propia.....	4
Figura 4: Elementos que constituyen una calculadora de impactos ambientales.....	5
Figura 5: Ejemplo de flujo de información de diseño basado en ACV usado por el software LCADesign. Fuente [23].....	7
Figura 6. Cuadro de dialogo de la calculadora Excel ECOBASE con formatos preestablecidos [46] .....	13
Figura 7. Funcionamiento esquemático de una calculadora para edificios. Verde: datos del usuario. Azul: datos de la calculadora.....	15
Figura 8. Captura de pantalla TOTEM.....	19
Figura 9. Distintos tipos de análisis realizados por Tally según el estadio de desarrollo del proyecto y documentación disponible en cada etapa [59].....	20
Figura 10. Diferencia entre el cálculo de emisiones y el cálculo de impactos en una huella de carbono.....	22
Figura 11. Ejemplos de reporte de diferentes calculadoras. Izquierda: Tally; Derecha: eToolLCD.24	
Figura 12. Comparación en gráfico de caja para huella de carbono para planchas de volcanita (según DAP). Izquierda: todas las planchas en registro. Derecha: una plancha seleccionada.....	32
Figura 13. Diagrama de Sankey en la EC3 indicando la ponderación de cada producto de construcción en el proyecto total [16]. .....	33
Figura 14. Flujo de información en la calculadora EC3 como complemento al flujo de información en el proceso de diseño y del ACV de edificio completo (Imagen de MKA en [16]). .....	34
Figura 15: Flujo de información de RETC antes y después de la implementación de la Ventanilla Única. Fuente [89].....	35

## Glosario

Término	Definición
<b>AEC</b>	: Arquitectura, ingeniería y construcción
<b>AECO</b>	Arquitectos, ingenieros, constructores y propietarios
<b>Análisis de ciclo de vida ACV</b>	: Recopilación y evaluación de las entradas, las salidas, y los impactos ambientales potenciales de un sistema de productos o producto durante su ciclo de vida (ISO 14044:2006)
<b>Análisis del inventario del ciclo de vida</b>	: Etapa de evaluación del ciclo de vida que implica recopilar y cuantificar las entradas y salidas de un sistema de producto o producto durante su ciclo de vida (ISO 14044:2006).
<b>ICV</b>	
<b>Base de datos genérica</b>	: Base de datos que contiene datos genéricos de ACV que no están vinculados a un fabricante o producto específico [1]
<b>Base de datos específica</b>	: Base de datos que contiene datos de ACV que son específicos para un determinado fabricante o producto, generalmente basados en una DAP (Declaración Ambiental de Producto) [1]
<b>Blockchain</b>	: también conocido como cadena de bloques es una tecnología que permite hacer más transparente las transacciones de valor. Este sistema de "contrato inteligente" permite cambiar como se efectúa la administración de obras en el sector construcción [2]
<b>Building Information Modeling (BIM)</b>	: conjunto de metodologías, tecnologías y estándares que permiten diseñar, construir y operar una edificación o infraestructura de forma colaborativa en un espacio virtual [3]
<b>Calculadora</b>	: Herramienta de cálculo simplificado y automatizado para la evaluación del ACV en edificación [4].
<b>Calculadoras genéricas</b>	: Herramientas para desarrollar un ACV que han sido desarrolladas para su aplicación en todos los sectores (i.e. Gabi, SimaPro, OpenLCA) [5].
<b>Circularidad</b>	: Capacidad de extender el fin de ciclo de vida útil mediante la mejora de las operaciones, el mantenimiento, la renovación, la reutilización y el reciclaje de los componentes del edificio y la construcción [6]

Término	Definición
<b>Construcción 4.0</b>	: cambio de paradigma bajo el cual la obra se transforma en una fábrica productiva en las que se "elaboran" productos a través de medios productivos (maquinaria) y mediante métodos organizados (proyectos), que permiten incorporar tecnologías que ya protagonizan relevantes innovaciones en otras industrias de concepción más productiva [2]
<b>Digitalización/transformación digital</b>	: cambio radical en la ejecución de procesos, producción y entrega de productos/ servicios a las personas, adaptándose a las necesidades de éstas y haciendo uso inteligente de las tecnologías disponibles, cuyo costo es cada vez menor [7]
<b>Elemento</b>	: Conjunto de materiales que debidamente dimensionados cumplen una función definida, tales como muros, tabiques, ventanas, puertas [8].
<b>Conjunto de datos (dataset)</b>	: Documento o archivo con información de ciclo debida para un producto específico u otra referencia (como sitio o proceso) que incluye metadatos descriptivos y datos cuantitativos para el inventario de ciclo de vida o análisis de impactos de ciclo de vida [9].
<b>Estándar</b>	: Documento, establecido por consenso y aprobado por un organismo reconocido, que entrega, para usos comunes y repetidos, reglas y directrices o características para actividades o sus resultados [3].
<b>Fabricación digital</b>	: Proceso que utiliza información de uno o más modelos BIM para facilitar la fabricación de componentes de construcción o ensamblajes (...) La información de los modelos ayuda a asegurar la precisión, así como también la reducción de desperdicios en la fase de fabricación. [3]
<b>Green Building XML (gbXML)</b>	: esquema XML de Green Building, o "gbXML", es un lenguaje desarrollado para facilitar la transferencia de información de construcción almacenada en modelos de información de construcción basados en CAD, permitiendo la interoperabilidad entre herramientas de software [10]
<b>IFC (Industry Foundation Class)</b>	: Esquema de base de datos ampliable que representa información de la construcción para el intercambio entre distintos software para arquitectura, ingeniería y construcción [3]
<b>Interoperabilidad</b>	: Capacidad de un producto o sistema para trabajar con otros productos o sistemas, [...] existentes o futuros, sin restricción de acceso o implementación [3]

<b>Término</b>	<b>Definición</b>
<b>Potencial de calentamiento global (PCG o GWP)</b>	: Indicador que mide cuánta energía absorberán las emisiones de 1 ton de gas de efecto invernadero durante un período de tiempo determinado, en relación con las emisiones de 1 ton de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ). Es un indicador creado para comparar el potencial de calentamiento global de distintos gases [11].
	Índice, basado en las propiedades radiativas de los GEI, que mide el forzamiento radiativo después de una emisión de pulso de una unidad de masa de un GEI dado en la atmósfera actual integrado en un horizonte temporal elegido, relativo al del dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) (ISO 14067:2018).
<b>Producto (de construcción)</b>	: Bienes o servicios utilizados durante el ciclo de vida de una construcción [12]. Por ejemplo: cemento, ladrillos.
<b>Plugin ACV</b>	: Un complemento a un componente informático existente (por ejemplo, un software de modelado BIM) que agrega funcionalidad específicamente para ejecutar un análisis del ciclo de vida [1]
<b>Sistema constructivo o ensamblado</b>	: Componente o conjunto de componentes incorporados en una <i>construcción</i> [12] .
<b>Software ACV</b>	: Herramienta de software desarrollada específicamente para la ejecución de un ACV y la posibilidad de calcular de acuerdo con diferentes metodologías [1].

## Resumen Ejecutivo

La gestión del carbono en la construcción es una necesidad urgente, pero la medición de las emisiones a nivel de producto y de edificación es un proceso complejo que solo expertos pueden realizar con precisión.

Las calculadoras de impactos ambientales en la construcción son creadas para resolver este desafío, ofreciendo soluciones tecnológicas que ayudan a orientar el diseño de productos y obras de construcción de forma simplificada.

Existe una gran variedad de calculadoras de construcción, que cubren distintos módulos de información (A1 a D), utilizan datos de diferentes calidades, consideran metodologías de cálculo distintas y ofrecen sus resultados en formatos únicos.

En este informe se cubren tres grandes tipos de calculadoras: las orientadas a productos, a edificaciones y las que están detrás de iniciativas sectoriales.

La aplicación al nivel de producto es para el cálculo de los impactos ambientales de los insumos de la construcción: cemento, hormigón, cristal, madera, acero, etc. Estas calculadoras pueden ser específicas para un tipo de producto o generales.

Estas calculadoras pueden trabajar con datos primarios, mixtos o puramente a partir de promedios sectoriales. De todas formas, típicamente presentan resultados de cuna a la puerta, por lo que se debería agregar calculadoras para transporte hasta el sitio de construcción si se quiere tener una perspectiva completa del ciclo de vida.

También existen las calculadoras genéricas de ACV, como Gabi, Simapro, Umberto u OpenLCA, que se pueden utilizar tanto para cálculo a nivel de producto o de edificio. Estas son bastante precisas, pero requieren alta experiencia y tiempo para hacer modelos representativos de los edificios, lo que las hace poco atractivas para la incorporación en la industria AECO.

Las calculadoras a nivel de edificación ofrecen una interfaz simplificada, basada en elementos y materiales de construcción y diseños en formatos geométricos (2D o 3D) y relación con los presupuestos de obra. Solicitan del usuario la cubicación y otros detalles de la obra y transforman esa información en una huella de carbono usando datos de fuentes variadas, como bases de datos genéricas, producto específicas y basadas en declaraciones ambientales de productos (DAP).

Las calculadoras a nivel de edificación deben aceptar una mayor imprecisión e integrarse en las etapas de diseño a través de los procesos y herramientas actuales de la industria. Esto genera un gran desafío que puede ser resuelto usando los datos necesarios para la cuantificación de huella de carbono para aportar otras informaciones que pueden beneficiar directamente a los usuarios, como estimación de presupuestos o trazabilidad para licitaciones.

Las aplicaciones sectoriales se resumen al seguimiento del impacto de políticas públicas y repositorios centralizados, alimentados por el uso de la propia calculadora. Para las tres aplicaciones Chile ya ha avanzado una buena parte del camino.

- Existe experiencia en calculadoras de productos (ECOBASE, Ábaco Chile), aunque no vigentes o incipientes.
- En edificación hay herramientas para estimación dinámica de uso de energía eléctrica y otra para carbono incorporado de la cuna a la puerta. Aunque falte la incorporación de factores de emisión, el impacto del transporte y la integración entre estas herramientas y las etapas de diseño, las bases de ellas están sentadas para datos de alta calidad adaptados a la geografía y matriz energética chilena.
- En el ámbito sectorial, el país ha tenido éxito con la centralización de la base de datos de registros de emisiones y transferencia de contaminantes que define las bases y experiencia tecnológicas y legales para un sistema similar para huella de carbono.

Para cualquier calculadora el desafío es asegurar un modelo económico y de gestión sólidos que permitan actualizar, mantener y adaptar la calculadora para asegurar su permanencia en el tiempo. Este modelo económico puede estar ligado a los incentivos de utilización de la herramienta a través de sistemas de certificación de edificaciones, etiquetas, sellos o exigencias para la licitación.

# 1 Introducción

## 1.1 Las calculadoras de Huella de Carbono en el Proceso de Diseño

Tradicionalmente el análisis de ciclo de vida (ACV) ha sido un ejercicio desarrollado por expertos, lo que limita su aplicación masiva para la evaluación de impactos de productos y servicios. En consecuencia, la medición de la huella de carbono para el ciclo de vida de las edificaciones no ha sido integrada de forma masiva en el proceso de diseño porque es percibido como un proceso complejo y que requiere mucho tiempo [5]. Esto debido a que los edificios son objetos de análisis complejos y por eso la producción de un ACV consume tiempo, datos y recursos [13].

Sin embargo en años recientes ha aumentado el interés por el impacto de la edificación a lo largo del ciclo de vida y junto con ella ha crecido la demanda por la aplicación del ACV durante la fase de diseño de los proyectos [1]. Esto debido a que el mayor potencial para la reducción de emisiones surge durante las primeras fases de diseño de un proyecto [4] tal como se muestra en la Figura 1.

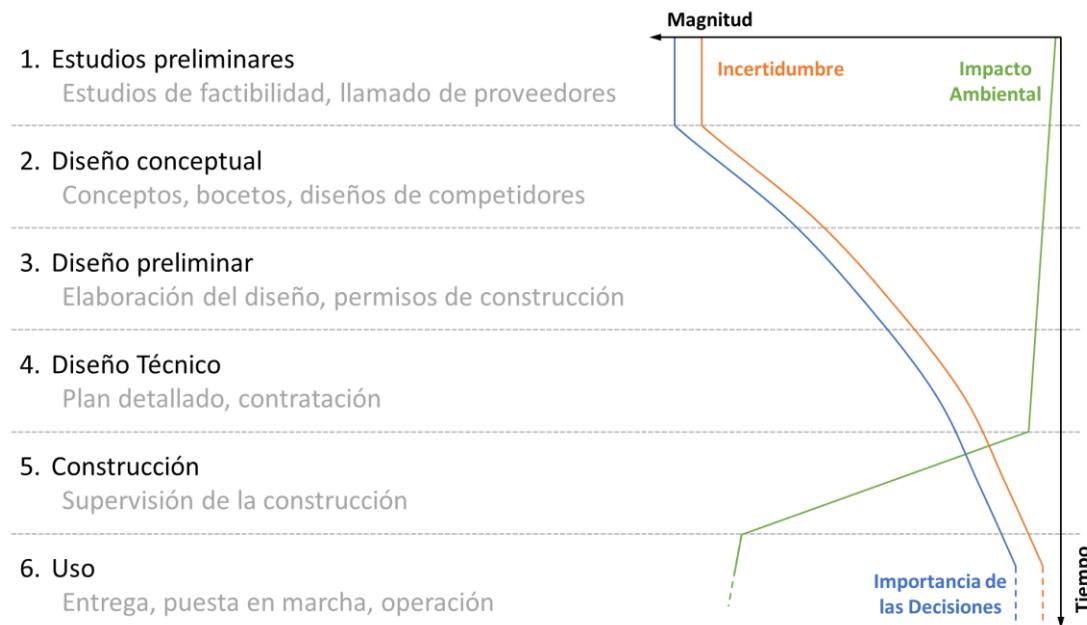


Figura 1: La importancia de las decisiones, la incertidumbre y el impacto ambiental durante las etapas del proceso de diseño arquitectónico [5].

Holberg denomina a esto el “dilema del ACV durante el proceso de diseño”: la dicotomía de que las decisiones tomadas en la etapa de diseño conceptual tienen la mayor influencia, pero al mismo tiempo la información disponible en esta etapa es escasa e incierta. La lista exacta de las cubicaciones de los materiales y la información específica de los productos especificados necesaria para un ACV completo solo están disponibles después de la etapa de diseño técnico, pero para entonces los resultados son menos útiles porque es demasiado costoso realizar cambios en esta etapa. Durante etapas posteriores al diseño técnico es posible cambiar algunos

productos, pero los cambios que contribuyen a reducir carbono incorporado, tales como la optimización de los miembros estructurales [14], son casi imposibles.

Para ello se han diseñado múltiples calculadoras, las que tienen un funcionamiento general como se indica en la Figura 2.

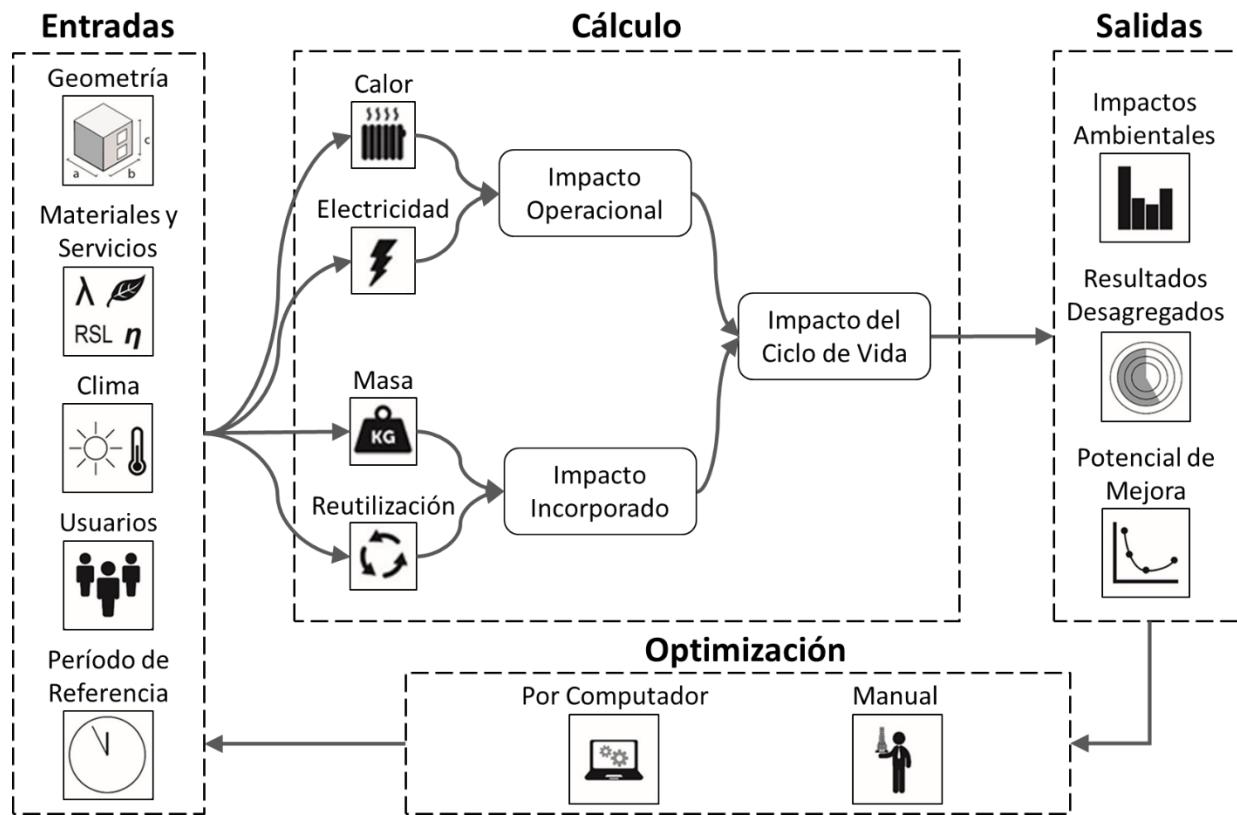


Figura 2. Descripción gráfica de una calculadora. Reproducción en base a [5].

Las calculadoras tienen la capacidad de tomar datos complejos de múltiples fuentes y generar con ellos resultados claros que responden a un objetivo. Un ejemplo de esto son las calculadoras de asistencia al diseño de edificaciones, que pueden tomar datos desde bases de datos, simulaciones de clima y las características del edificio (ingresadas por el usuario) y con ello estimar los impactos ambientales de la obra.

La aplicación de las calculadoras en etapas tempranas del diseño conlleva a una importante reducción de la precisión del análisis, pero esta es la etapa para realizar los cambios más costo efectivos [4].

Por estos motivos, durante los últimos años ha surgido un gran número de calculadoras para cubrir la alta demanda por herramientas simplificadas que los arquitectos puedan utilizar sin tener conocimiento de ACV [5], algunas hasta gratuitas. Esto ha tornado la medición de huella de carbono más accesible a la industria AECO. La gama de herramientas es amplia, siendo algunas desarrolladas específicamente para permitir evaluaciones iniciales en la etapa de diseño [4].

Algunos ejemplos de herramientas populares para asistir el diseño en la construcción a través del ACV incluyen: One Click LCA de la empresa finlandesa Bionova; Tally, un complemento desarrollado en Estados Unidos para el software de diseño Revit<sup>1</sup> y eToolLCD para el sector construcción en Australia. Estas herramientas aún tienen un alto nivel de complejidad.

En años recientes han surgido herramientas mucho más simplificadas disponibles en internet, tales como DeQo y RICS database que permiten crear una base de datos por crowdsourcing a partir del registro realizado por los mismos diseñadores que consultan la herramienta [15].

Las fuentes de datos de estas herramientas son las bases de datos genéricas, producto-específicas o basadas en DAP. Por ejemplo, la calculadora EC3 calcula las emisiones de carbono en etapas tempranas a partir de una base de datos agregada de más de 20.000 DAP provenientes de diversos programas [16].

También existen calculadoras que facilitan la producción de ACV para productos [17]. Algunas de estas herramientas, llamadas calculadoras genéricas, están diseñadas para un uso en todos los sectores de la economía (i.e. Gabi, SimaPro y Umberto, entre otros), mientras que otras están destinadas a analizar un mercado específica como los procesos de envasado o el sector de la construcción [18].

## 1.2 Software y Tecnologías para Diseño de Edificaciones

Al hablar sobre integración con softwares de diseño, es importante comprender algunos conceptos relacionados a ellos.

Una herramienta central para el diseño de edificaciones es el Modelado de Información de Edificios (BIM). Un objeto BIM es la representación digital de características físicas y funcionales de un objeto, incluyendo sus dimensiones, posición espacial y sus características intrínsecas [19]. Por ejemplo, una puerta representada en BIM guarda las características de su tamaño, material, color, terminación y transmitancia, entre otras.

Para representar un objeto BIM en un computador es necesario tener un conjunto de reglas. Estas reglas son llamadas *Industry Foundation Classes* (IFC). El formato IFC es un modelo de datos abierto y neutral, no siendo propiedad de ningún proveedor. Además, es un formato regido por una norma ISO. Por lo tanto, IFC garantiza que el diseño BIM creado en un software pueda ser transferido a cualquier otro [20].

Usando una analogía: los objetos BIM son palabras, un edificio BIM es un libro y el formato IFC es el lenguaje. El hecho de que IFC sea estándar garantiza que todos los softwares hablen el mismo idioma.

La ventaja de BIM es que estos objetos guardan información que puede ser usada en todas las etapas del proyecto de construcción.

---

<sup>1</sup> Revit es el software multidisciplinario BIM creado por la empresa Autodesk.

Retomando el ejemplo de la puerta: el constructor puede tomar todas las características de la puerta definidas por el arquitecto y abrir una licitación. Los proveedores hacen sus ofertas de acuerdo a las especificaciones requeridas y la información del proveedor elegido es agregada al modelo BIM para la puerta. Si hay necesidad de repararla, el administrador simplemente vuelve al modelo BIM para encontrar todas las especificaciones que necesita. Finalizada la reparación, el objeto BIM es actualizado con los nuevos datos [20].

Para diseñar un modelo 3D de un edificio se puede usar un software que ocupe objetos BIM. Sin embargo, esto puede ser muy demandante para etapas tempranas de diseño. Por eso, es común que diseños conceptuales ocupen softwares de modelamiento 3D que no son basados en BIM, pero que tienen un formato IFC. La Figura 3 muestra algunos ejemplos de softwares que son usados en las distintas etapas de un proyecto de construcción.

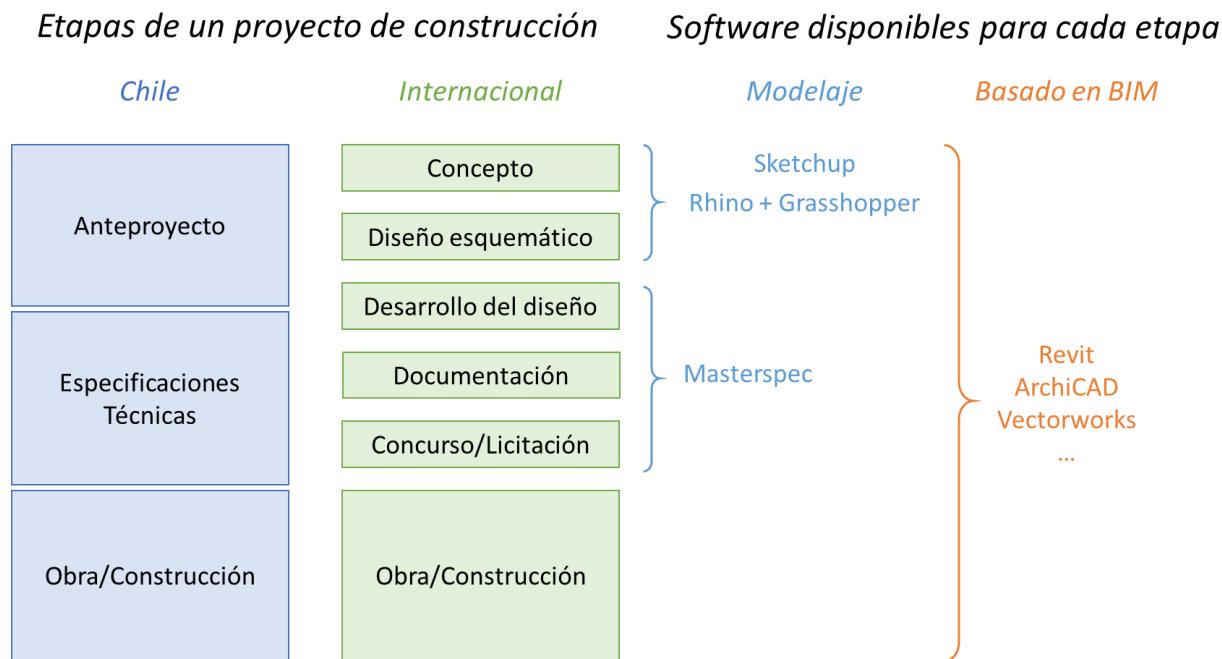


Figura 3: Ejemplos de softwares usados en las distintas etapas de un proyecto de construcción. Elaboración propia.<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Las etapas de los proyectos de construcción no están estandarizadas en Chile, pero de acuerdo a la práctica profesional se reconocen las tres mencionadas en la figura. Estas etapas también pueden ser llamadas: Diseño, Diseño arquitectónico o planimetría, entre otras.

## 1.3 Metodología del Estudio

### 1.3.1 Elementos analizados

El rol de las calculadoras es manipular e integrar grandes cantidades de datos para cuantificar los impactos ambientales de las edificaciones o los productos, tornando el cálculo de la huella de carbono más rápido, fácil y accesible. Para cumplir ese rol, las calculadoras tienen elementos estructurales [5], mostrados en la Figura 4, que serán analizados en este informe.

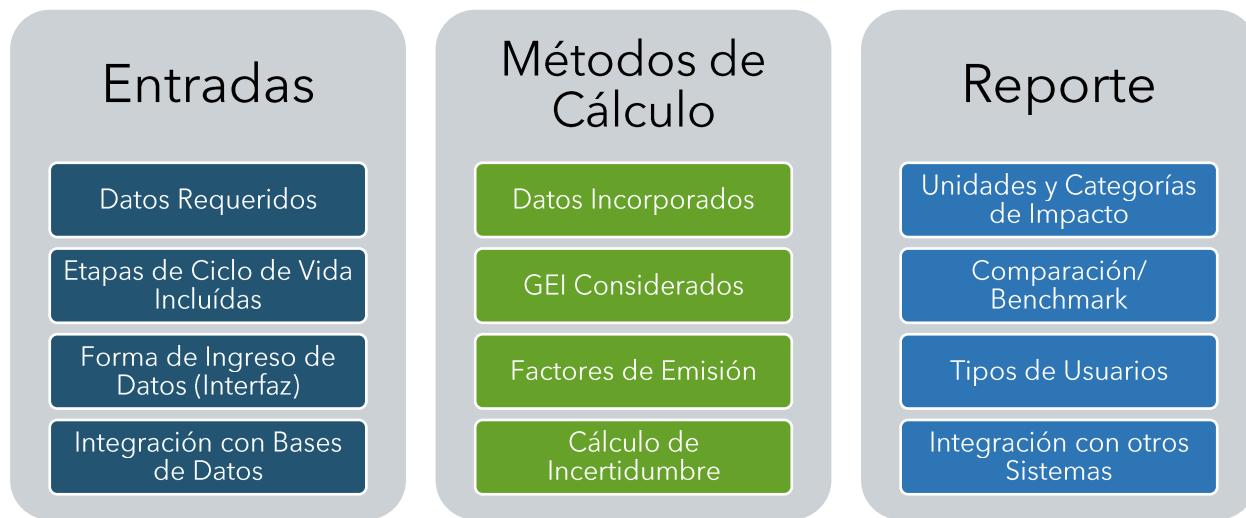


Figura 4: Elementos que constituyen una calculadora de impactos ambientales.

Estos elementos están presentes en diversos estudios comparativos entre calculadoras y herramientas para cálculo de ACV y Huella de Carbono en la construcción [5], [17], [21], [22].

En términos generales es posible identificar cuatro tipos de calculadoras para la medición de huella de carbono en el sector de la construcción:

- Software:** Paquete informático desarrollado específicamente para la ejecución de un ACV y la posibilidad de calcular de acuerdo con diferentes metodologías. Estas herramientas generalmente traen incorporada una base de datos de ACV, permiten la inserción de cubicación de material (directamente a través de una importación de archivos), la vinculación de conjuntos de datos (datasets) de ACV a los materiales o sistemas constructivos, y el cálculo, visualización y análisis del impacto ambiental [1].
- Plugin de BIM:** Conocidas también como *CAD integrated*, se definen como un componente informático que permite la integración con herramientas BIM. Estas herramientas permiten la evaluación iterativa de las reducciones de carbono con cada uno de los cambios de diseño. La integración con BIM permite mejorar la capacidad de los propietarios y ocupantes para garantizar que el carbono incorporado y operativo se pueda minimizar durante el uso, mantenimiento, renovación y al final de la vida útil [4].
- Herramienta Excel:** También conocidas como basadas en planillas (*spreadsheet based*), son las que se construyen sobre el programa informático Microsoft Excel y que forma parte

del paquete Microsoft Office. La mayoría de las herramientas disponibles para la medición de huella de carbono utilizan este formato [5], donde el impacto incorporado se calcula multiplicando las cubicaciones de material (kg) por los datos de impacto ambiental de los respectivos productos [15].

4. **Herramienta Online:** Corresponde a las calculadoras que se alojan en servidores y que están disponibles a través de una conexión a internet. Cualquiera de las herramientas descritas anteriormente puede adoptar esta característica, por ejemplo software y herramientas Excel.

Las calculadoras varían también en su alcance (producto, edificación, módulos de información según ISO 21930), por lo que también cambian los datos que requieren. La propia interfaz (tipo de calculadora) delimitan la forma de ingreso de estos datos y la potencial integración con otras herramientas de diseño para facilitar este paso.

Algunas calculadoras entregan suposiciones predefinidas para hacer un cálculo direccional y guiar el diseño rápidamente. Otras se enfocan en la precisión de la cuantificación ofreciendo muchas posibilidades de personalización y detalle que aportan a la precisión a cambio de complejidad de uso y tiempo para el estudio.

Para efectos de huella de carbono, las calculadoras suelen utilizar el mismo método de impacto (GWP100), pero varían en sus resultados debido a los distintos factores de emisión que manejan. Estos factores provienen de bases de datos genéricas, producto específicas o basadas en DAP. Asimismo, varían los gases que consideran en sus bases de datos. Además, cada calculadora tiene un tratamiento diferente de la incertidumbre.

Finalmente, las calculadoras varían en sus objetivos, lo que afecta la clase de reporte que entregan. Muchas herramientas entregan resultados por área construida y además lo pueden hacer por material, elemento o por el edificio completo. Aunque las calculadoras suelen entregar los impactos ambientales de más categorías de impacto, como biodiversidad o uso de la tierra, este informe se enfoca en la huella de carbono. Los usuarios de estos reportes son múltiples: desde los arquitectos que lideran el diseño hasta sistemas de certificación de edificaciones (SCE), tales como LEED.

Este marco de análisis es de interés, debido a que sigue la estructura de los flujos de información del diseño basado en ACV, mostrado en la Figura 5 [23]. En construcción, la disponibilidad y precisión de los datos aumenta en la medida en que se avanza desde el anteproyecto hacia la ingeniería de detalle. Esto es importante ya que para calcular la huella de carbono de la edificación se requiere, entre otras cosas, la masa total de cada material utilizado. En el anteproyecto solo se tiene una estimación de la cantidad y sólo del sistema estructural, mientras que a nivel de detalle se conocen todos los materiales, incluyendo las terminaciones.

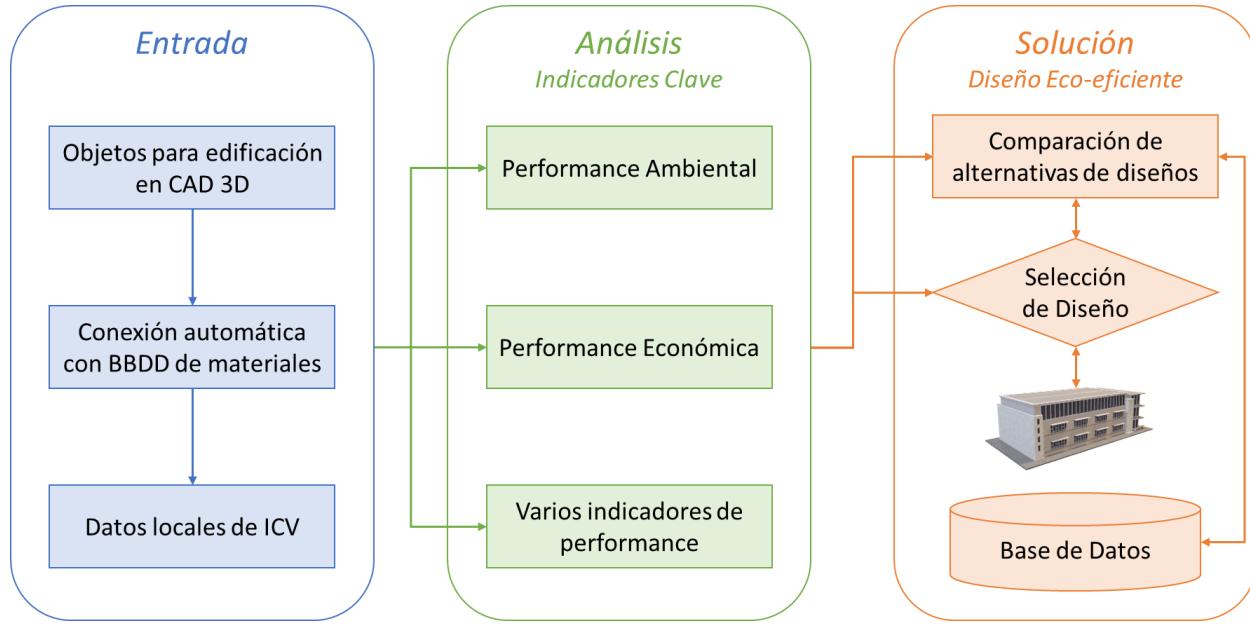


Figura 5: Ejemplo de flujo de información de diseño basado en ACV usado por el software LCADesign. Fuente [23].

### 1.3.2 Selección de Calculadoras

Se realizó una búsqueda extensiva de calculadoras para retratar su variedad, como se muestra en la Tabla 1. Públicas o privadas, base tecnológica, alcance (productos, edificaciones, transporte y políticas públicas) y también su precio. Se privilegiaron calculadoras vigentes, aunque también hay ejemplos de calculadoras que, si bien en funcionamiento, no han recibido actualización reciente.

Varias de estas calculadoras están asociadas a sistemas de certificación de edificios (SCEs) para el cumplimiento de créditos de ACV o de medición de la huella de carbono, otras se dedican a la producción de declaraciones ambientales de productos de sectores específicos e incluso existen las que han sido diseñadas con fines educativos.

El foco de esta revisión es mostrar las características de las calculadoras presentes en el mercado y no un instrumento en particular, por lo que en la revisión no necesariamente se entregan detalles sobre cada metodología.

Tabla 1. Herramientas revisadas en este informe, por aplicación, tipo y procedencia.

Alcance		Excel	Online	Software	Plug-in BIM
<b>Producto</b>	Pública	ECOBASE			
	Privada	GHG Protocol <sup>2</sup>	ERFMI TEPPFA Climate Earth GCCA EPD tool	SimaPro <sup>1</sup> GaBI <sup>1</sup> Umberto <sup>1</sup> Open LCA <sup>1, 2</sup>	
<b>Edificación</b>	Pública	Ábaco <sup>2</sup>	TOTEM <sup>2</sup> OERCO2 <sup>2</sup>	Elodie	
	Privada		Ecómetro <sup>2</sup> EC3 deQo	AthenalE OneClick LCA etoolLCD IES Legep	Tally
<b>Otra infraestructura</b>	Pública		HueCO2 <sup>2</sup> asPECT <sup>2</sup>		
	Privada			Athena Pavement	
<b>Transporte</b>	Privada		Sea freight <sup>2</sup> Flexport		
<b>Políticas públicas</b>	Privada	GHG Protocol <sup>2</sup>			

<sup>1</sup> Software de ACV que permite el cálculo de huellas de carbono para cualquier producto o servicio.

<sup>2</sup> Herramienta gratuita

## 2 Aplicación a Productos

### 2.1 Revisión internacional

En esta sección se revisarán alternativas de calculadoras para la producción de huella de carbono de productos de la construcción, desde las más precisas (menos incertidumbre) a las más genéricas (más incertidumbre).

Cada una de las alternativas varía en sus:

- Fuentes de información: datos primarios o secundarios;
- Modelos para el análisis: solo huella de carbono o múltiples impactos;
- Resultados: nivel de incertidumbre;
- Aplicaciones: ecodiseño de productos, declaración ambiental de productos, decisión de compra en base a DAP, entre otros.

#### 2.1.1 Calculadoras de huella de carbono de productos

El GHG Protocol tiene varias calculadoras a nivel de productos disponibles de forma gratuita [24]. Estas calculadoras están basadas en Excel y se enfocan en solicitar al usuario datos de actividad sobre la producción (módulos de información A1-A3 del ciclo de vida según ISO 21930). Su antigüedad y nivel de detalle es variado.

La metodología de cálculo de las herramientas de GHG Protocol se transparenta en sus Guías de herramientas. Normalmente, la metodología surge de una combinación de métodos usados por otras fuentes confiables, como por ejemplo el IPCC, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) o los estándares europeos (EU-ETS) [25].

Adicionalmente a las calculadoras de productos, GHG Protocol ofrece calculadoras de incertidumbre, también basadas en Excel. En estas calculadoras el analista ingresa todas las fuentes de datos para su inventario (datos de actividad y factores de emisión) y les asigna una evaluación cualitativa a cinco parámetros: Confiabilidad del dato, Completitud, Representatividad temporal, geográfica y tecnológica. El Excel logra el cálculo de la huella de carbono y la determinación de la incertidumbre [26].

Las herramientas del GHG Protocol cumplen con las características de transparencia, coherencia, comparabilidad, exhaustividad y precisión, pero no se integran con otras herramientas. Es decir, el usuario necesita ingresar los datos y extraer los resultados de forma manual para aprovecharlos en otros cálculos.

En adición a las herramientas basadas en Excel con foco en productos específicos se encuentran los softwares de análisis de ciclo de vida como SimaPro, Umberto, GaBI u OpenLCA, que permiten modelar todo el sistema producto. El software tiene asociadas bases de datos y modelos de impacto que logran calcular los impactos en pocos segundos una vez que se ha modelado el sistema.

## 2.1.2 Calculadoras en base a reglas por categoría de producto

El cálculo de una declaración ambiental de producto (DAP) o una huella de carbono de producto se debe hacer en base a una regla por categoría de producto (RCP) [27]–[29]. Por ser una DAP, el resultado tendrá varios impactos ambientales, uno de los cuales será el potencial de calentamiento global (huella de carbono).

Una DAP puede ser producida por un consultor o de forma automatizada a través de una calculadora. Las calculadoras ofrecen modelos basados en RCP, con bases de datos preseleccionadas que facilitan la producción de la DAP. Estas calculadoras existen como software independiente, dentro de una plataforma web [30]–[33] o como parte de un software para la producción de análisis de ciclo de vida (ACV), como SimaPro [34] y GaBI [35].

Si la calculadora es lo suficientemente estructurada incluso se puede lograr la verificación automática de la DAP [30], acelerando el proceso de publicación y reduciendo los costos a la empresa.

La calculadora contiene el modelo (basado en la RCP) y los conjuntos de datos asociados a los insumos para ese modelo. El usuario completa el modelo con los datos de su propio proceso. De esta forma se configura un mix de datos primarios para el producto que prioriza la calidad de los datos de su proceso productivo y confía en la precisión de datos de sus insumos, como se muestra en la Tabla 2.

*Tabla 2. Tipos de datos incluidos en una calculadora de declaración ambiental de productos basada en reglas por categoría de productos.*

Aspecto	Tipo de datos	Fuente
Datos de actividad	Datos primarios	Empresa dueña del producto
Datos del ciclo de vida de los insumos	Datos secundarios	Base de datos del software, normalmente limitada a los datos requeridos para esa RCP
Factores de emisión	Datos secundarios	Base de datos del software

Lo que distingue a este tipo de calculadoras de las calculadoras en base a DAP (más adelante) es la utilización de datos primarios de actividad dentro de un modelo basado en RCP. Estos datos son de alta calidad y precisión, lo que reduce la incertidumbre del estudio, a pesar de que se usen datos secundarios para los impactos de ciclo de vida de los insumos.

En cuanto a estos últimos, la base de datos del software puede ser genérica, producto-específica o incluso basada en otras DAP. En general, para facilitar la producción de la DAP, el productor del software preselecciona los conjuntos de datos más apropiados para el cliente. Por ejemplo, seleccionando una matriz eléctrica apropiada para su geografía o preseleccionando conjuntos de datos de insumos lo más similares posibles a los que realmente utiliza [30], [35].

En estos casos, los datos de entrada son bases de datos para los insumos (datos secundarios), los datos de actividad de la empresa que realiza la DAP (datos primarios) y factores de emisión

validados (datos secundarios). La mayor precisión de los datos reduce la incertidumbre de los resultados y entrega valores específicos de huella de carbono y otros impactos ambientales para los productos estudiados. De esta forma, estas calculadoras logran DAP específicas para los productos de la empresa, ya que usan los datos de actividad de la propia empresa.

Los resultados de estas DAP permiten usos variados, como diferenciar el desempeño ambiental entre productos de la misma categoría y orientar decisiones de diseño (ecodiseño).

### 2.1.3 Calculadoras en base a DAP

Existen también calculadoras de productos basadas en datos de declaraciones ambientales de productos. Estas calculadoras generan una DAP<sup>3</sup> de forma automática de acuerdo con datos ingresados por el usuario.

Para construir estas calculadoras se requieren datos de consumos, emisiones e impactos de varios productores de la misma categoría de productos, levantados con la misma metodología. Estos datos son enviados a un sistema o consultor centralizado, que determina los promedios y desviaciones estándar y luego los plasma en un modelo. Cuando un usuario ingresa datos sobre la categoría de producto que desea, la herramienta genera una DAP en base a este modelo promediado. Ejemplos de estas calculadoras son: La calculadora de DAP de ERFMI [36], TEPPFA [37], Climate Earth [38].

Desde la perspectiva del producto para el cual se está calculando la DAP se puede considerar que casi todos los datos son secundarios, ya que son promedios de datos de múltiples empresas. Esto implica que la incertidumbre del resultado será mayor, aunque aún puede servir para aplicaciones como la postulación a licitaciones que solo exijan tener una DAP y orientar decisiones tempranas para el diseño de nuevos productos.

En algunos países o sistemas de certificación se solicita mostrar las DAP de los productos utilizados para la construcción. Sin embargo, en muchos casos no se exige un nivel de calidad de estas DAP. Las DAP producidas con calculadoras son aceptadas para licitaciones, lo que se transforma en un incentivo para el uso de estas herramientas. Por supuesto, si todos los oferentes han usado las mismas calculadoras en base a datos secundarios, esto no haría posible la selección de productos en base a sus resultados, ya que probablemente serían muy parecidos.

Cuando la calculadora permite modificaciones en la composición del producto, como en el caso de las calculadoras para concreto [38], estas pueden ayudar a los usuarios a orientar decisiones de diseño de nuevos productos. En el caso del concreto, se puede revisar el desempeño ambiental de varias mezclas en pocos minutos y de esa forma orientar el diseño.

---

<sup>3</sup> Todas las declaraciones ambientales de producto (DAP) incluyen el cálculo del potencial de calentamiento global, o huella de carbono. Por eso cuando se hable de DAP en este informe se puede considerar que es una herramienta para la producción de huellas de carbono de productos estandarizadas y comparables.

## 2.1.4 Calculadoras de transporte

De la misma forma que se puede estandarizar el cálculo del carbono incorporado en productos, se puede programar el cálculo de las emisiones del transporte dependiendo de la distancia, el peso de la carga, el modo de transporte y el combustible utilizado, como se ve en la Tabla 3.

*Tabla 3. Ejemplo de cálculo efecto de la huella de carbono del transporte sobre el impacto incorporado del material en obra.*

[kg CO <sub>2</sub> eq por tonelada de barras]	Material virgen (Chile)	Material Reciclado (Chile)	Material Virgen (China)
Huella de carbono Barra	2.560	767	2.560
Huella de carbono Transporte	59,85	59,85	254.1
Huella Total	2619,85	826,85	2.814.1
<b>Contribución del transporte a la huella de carbono</b>	<b>2,33%</b>	<b>7,8%</b>	<b>9,9%</b>

En la Tabla 3 se toman dos factores de emisión diferentes para barras de refuerzo producidas en Chile: una para barras a partir de mineral [39] y otra para barras a partir de material reciclado [40]. Se supone para efectos de este ejemplo que las barras chinas tienen la misma huella de carbono que las chilenas. Se adiciona el impacto de 500 km de transporte de tierra para las alternativas nacionales y 21.000 km de transporte marítimo para la alternativa extranjera [41].

De la tabla se extrae que el impacto del transporte sobre la huella de carbono de los materiales de la construcción puede variar considerablemente entre un aspecto no material (menos del 5% de la huella) a uno material, dependiendo, en este caso, de la procedencia del material y su huella de carbono de la cuna a la puerta. El transporte de los productos siempre debería considerarse para el cálculo de métricas del ciclo de vida, como la huella de carbono [42]. Para la huella de carbono de la edificación, esto significa considerar no solo los impactos del carbono incorporado en el material, sino también los de la logística. La adición del transporte de productos cambia el resultado de la huella de carbono, lo que se hace más relevante según la distancia entre el punto de producción y de consumo y el peso del producto transportado.

Dado que las DAP de productos suelen considerar solo los impactos entre la cuna y la puerta, es necesario incorporar los impactos del transporte en el caso de una calculadora de edificación, para completar el ciclo de vida de la edificación y reflejar fielmente los impactos.

Existen dos alternativas para el cálculo de esta huella: calculadoras independientes solo para transporte, como Seafreight Carbon Calculator [43] y cálculo de impactos del transporte incorporados en una herramienta más amplia de huella de carbono, como Flexport [44].

## 2.2 Revisión nacional

Dentro del contexto de las calculadoras de producto, destacan ECOBASE construcción, desactualizada desde el 2015 y Ábaco, en construcción desde 2017 [45].

La calculadora ECOBASE es una herramienta basada en Excel que funciona a través de una selección preestablecida de los productos a analizar, con el fin de disminuir el número de datos de entrada a ingresar por el usuario [46], como se muestra en la Figura 6.

Seleccione formato de producto que desea analizar	
Productos típicos	Plancha Yeso Cartón 8mm 120x240cm
# unidades	10 unidad(es)
Peso/Volumen total	187,200 kg
Peso/Volumen producto unitario	18,720 kg

Figura 6. Cuadro de dialogo de la calculadora Excel ECOBASE con formatos preestablecidos [46]

En el caso de una plancha de dimensiones típicas 8 mm 120x240cm, se presenta la cantidad equivalente en la unidad correspondiente analizada. En el caso del ejemplo, 10 planchas de yeso cartón de 8mm 120x240cm son igual a 187,2 kg [46].

El foco de ECOBASE fue la generación de inventarios nacionales, por lo que incluía datos primarios y secundarios solo en el caso que los primarios no estuvieran disponibles.

La calculadora entrega los resultados de impacto en la unidad “Ecopunto”, una unidad agregada de varios impactos ambientales, incluyendo huella de carbono. Este sistema de puntuación es básicamente un proceso de ponderación de los impactos ambientales normalizados. Estos ponderadores son producto de encuestas realizadas anteriormente fuera del marco del proyecto, y no han sido sometidas a un proceso de validación de terceros. El uso de estos Ecopuntos es exclusivamente para gestión interna [46].

Un segundo ejemplo es la calculadora online Ábaco (vigente), de acceso gratuito. Dedicada específicamente al cálculo del carbono incorporado de materiales de construcción y edificaciones. La metodología de cálculo para materiales incluye desde la extracción de materias primas hasta la “puerta” del productor (módulos de información A1-A3) [47] y el método de cálculo para edificaciones considera todas las partidas presupuestarias, según las cubicaciones. Es decir, la herramienta descansa sobre bases de datos (datos secundarios) para entregar resultados.

La calculadora está montada sobre dos bases de datos diferentes [47]:

- Base de datos de recursos: es una lista codificada de elementos de uso común en proyectos de construcción, divididos en materiales, maquinaria y mano de obra. A la fecha de publicación de este informe se está operando solo con materiales.
- Base de datos de actividad: una lista codificada de ítems típicos de un presupuesto para construcción.

Ambas contienen los costos, impactos ambientales e impactos sociales de cada ítem.

Desde el punto de vista del levantamiento de datos, esta calculadora se basa en los datos de Ecoinvent 3.0, con una adaptación central: se utiliza la matriz energética chilena del año 2017, con *todos sus impactos de ciclo de vida* de las tecnologías de generación usadas en Chile. Es decir,

esta medida de carbono incorporado no solo cuenta las emisiones directas de la producción de las materias primas, sino también las indirectas [47].

### 2.3 Diagnóstico del capítulo

En Chile la experiencia de calculadoras para el ciclo de vida de los materiales es pequeña, pero ha avanzado en complejidad desde una herramienta basada en Excel (ECOBASE) a una calculadora online abierta (Ábaco).

Esto es solo una muestra de la variedad tecnológica y de las fuentes de datos de las calculadoras revisadas: desde las que trabajan con datos primarios, como GHG Protocol, las mixtas, como ECOBASE, hasta las que permiten generar declaraciones ambientales de productos a partir de promedios sectoriales. Esta variedad también limita la calidad de los resultados y los usos que se les pueden dar.

Dada la multitud de escenarios de uso para varios materiales de la construcción, los resultados de las calculadoras de producto suelen incluir solamente los resultados desde la extracción de materias primas hasta la puerta del productor, excluyendo el transporte hasta el sitio del uso y las emisiones asociadas al uso del material en la edificación y su fin de vida. Estos resultados se entregan en la forma de un número, un reporte o incluso una declaración ambiental de producto verificada.

La integración de la huella de carbono del transporte para los materiales de construcción puede mostrar de forma más fidedigna el impacto de la elección de materiales, en particular cuando se comparan materiales importados con aquellos de producción nacional y diferenciar la real huella de carbono de edificaciones en diferentes regiones del país.

### 2.4 Conclusión del capítulo

El uso que se le dará a los resultados de la huella influye sobre las fuentes de datos de las calculadoras, como orientar decisiones de diseño, acreditar la elección de un material sobre otro, o reportar de forma precisa los resultados de huella de carbono del producto o de la edificación.

Asimismo, es necesario tener en mente las etapas del ciclo de vida que están cubiertas en las fuentes de datos. Si las huellas de carbono de los materiales solo consideran impactos entre la cuna y la puerta del productor, es necesario agregar la huella de carbono del transporte. Esta información también permite comparar de forma más justa las huellas de carbono de los materiales a la hora de compararlos y elegir un proveedor sobre otro.

### 3 Aplicación a Edificación

#### 3.1 Revisión internacional

Los principales problemas que se pueden encontrar al intentar evaluar el impacto ambiental de un edificio son [48]:

- La necesidad de proporcionar resultados confiables (*input*);
- Establecer vida útil de los diferentes elementos;
- La complejidad de los cálculos (análisis);
- La dificultad para acceder y usar los datos que necesita para los cálculos (análisis).

Para enfrentar este problema se desarrollan calculadoras de impactos en el ciclo de vida de los edificios, que tienen por finalidad facilitar el trabajo del arquitecto, simplificando lo más posible la generación de los resultados.

A diferencia de las calculadoras para producto, en el caso de las de edificaciones no se puede usar una DAP promedio del edificio completo, porque cada proyecto es muy diferente de los otros. En cambio, este tipo de calculadora necesita datos primarios sobre el consumo de materiales (cubicaciones), vida útil de referencia del edificio y elementos constructivos. Esta información se combina con los resultados de impacto ambiental en las DAP de cada uno de los materiales, elementos y procesos considerados, entre otros, para estimar la huella de carbono (normalmente dentro de un análisis de ciclo de vida), como se ve en la Figura 7.

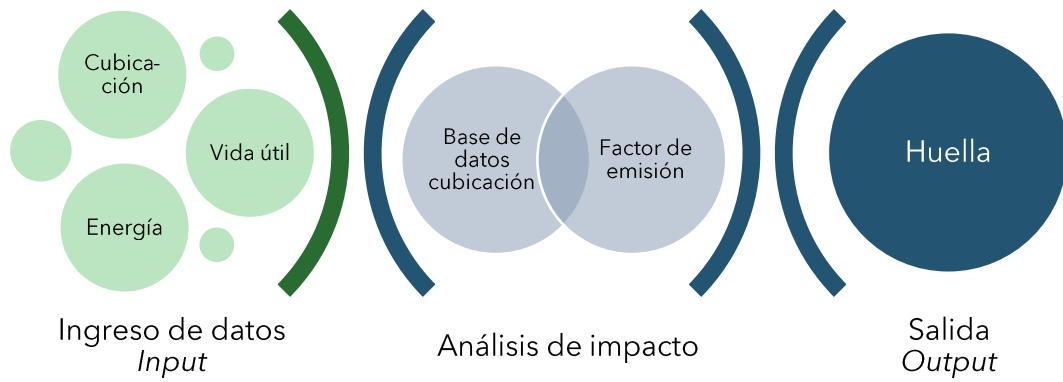


Figura 7. Funcionamiento esquemático de una calculadora para edificios.  
Verde: datos del usuario. Azul: datos de la calculadora.

Las calculadoras recogen datos sobre el diseño del edificio, por ejemplo de las cubicaciones, su vida útil y su energía operacional y relacionan esos datos con información del ciclo de vida de los materiales a través de bases de datos de emisiones en el ciclo de vida. El software usa las emisiones del ciclo de vida y las computa junto a los factores de emisión de los diversos gases de efecto invernadero para producir la huella de carbono, normalmente como parte de un ACV.

Para exemplificar el proceso de uso de estas calculadoras dentro del proceso de diseño, se presenta un ejemplo en la Tabla 4.

*Tabla 4. Ejemplo de acciones a realizar por un usuario durante las tres etapas de diseño en la calculadora de edificación LCADesign [23].*

Etapa	Sub etapas
<b>Input</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Crear o ingresar el modelo CAD 3D de un edificio.</li> <li>• Cubicar o ingresar la cubicación de los materiales</li> </ul>
<b>Análisis</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Calcular indicadores ambientales basados en el análisis del ciclo de vida (ACV) factorizando la cubicación de materiales con su generación de emisiones y agotamiento de recursos proveniente una base de datos.</li> <li>• Ver información de resumen detallada para revelar hotspots en términos de producto / ubicación en el modelo de construcción</li> <li>• Llevar a cabo análisis de diseños alternativos</li> </ul>
<b>Output</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Comparar el impacto ambiental de diseños alternativos</li> <li>• Estudios de referencia de múltiples edificios en el tiempo para facilitar el desarrollo de una base de datos de desempeño de productos de construcción para apoyar el diseño de edificios con menor impacto ambiental.</li> </ul>

Este tipo de herramienta se concentra en apoyar decisiones de diseño de los edificios. Su funcionamiento es en base a distintos formatos (Excel, online, software), alcances (etapas en el ciclo de vida) y niveles de precisión (bases de datos genéricas, producto específicas o sobre la base de declaraciones ambientales de producto). Por eso se considera que estas herramientas ofrecen cálculos simplificados para el ciclo de vida, como se comentará en este capítulo.

Cabe destacar que existe un gran número de herramientas internacionales, y que muchas de estas herramientas han quedado obsoletas con el tiempo. De acuerdo a Bionova, la empresa detrás de One Click LCA, algunas de las razones detrás de la desaparición prematura de estas herramientas se deben a razones específicas de la evaluación del ciclo de vida del edificio. Debido a que cuando se trata de calcular los impactos ambientales de un edificio, la *precisión de los resultados* y la *disponibilidad de datos* se vuelven esenciales [48].

A continuación, se describen algunas de las herramientas disponibles en el mercado y su caracterización de acuerdo a los datos de ingreso requeridos, el proceso de cálculo y sus salidas.

### 3.1.1 Datos de entrada

Los principales datos de entrada de para el cálculo del ACV o huella de carbono del edificio son:

- Cubicación: entrega la cantidad en masa de material por tipo de producto en la edificación (kg de material).
- Vida útil de referencia: permite estimar la demanda energética total y la cantidad de mantenciones y reparaciones;
- Demanda energética: el carbono operacional.

Adicionalmente, si el límite del sistema del estudio va más allá de la etapa de producto (módulos A1-A3) se requieren datos sobre el transporte al sitio, construcción e instalación, las etapas de operación y fin de vida.

Las calculadoras varían en su inclusión de los módulos de información B, C y D.

- En algunos casos estos módulos *solo se consideran* en la medida que las bases de datos *para los materiales* incluyan esta información. Por ejemplo: en OneClick LCA.
- En otros casos, el propio software trae esta información. Por ejemplo, la última versión de Athena IE tiene en cuenta los impactos ambientales en las siguientes etapas del ciclo de vida: fabricación de materiales (incluida la extracción de recursos y reciclado contenido), transporte relacionado, construcción en el sitio, mantenimiento y efectos de reemplazo, y demolición y eliminación [49].
- En otras ocasiones, los escenarios de fin de vida y vida útil del edificio se establecen según los parámetros de la certificación para la cual se requiere el cálculo. Por ejemplo: LEED o BREEAM [50].

Asimismo, cada calculadora se diferencia en los datos de entrada que acepta y la forma de ingresarlos. En el caso del ingreso manual de datos encontramos calculadoras de Excel, que aceptan datos en formato tabular y otras calculadoras en base a software u online, que solicitan los datos a través de ventanas de diálogo. Desde el punto de vista de la integración al diseño, esto no es práctico, ya que la entrada manual de datos, como por ejemplo, superficies en  $m^2$ , toma tiempo, conduce a error y requiere un amplio conocimiento de ACV [5].

En el caso de la herramienta Athena IE, los usuarios describen los sistemas constructivos del edificio utilizando cuadros de diálogo a través de los cuales se ingresan datos tales como las dimensiones de las plantas y las cargas ocupacionales [51]. Lo mismo ocurre en el caso de Athena Pavement, donde los usuarios ingresan los parámetros de construcción y rehabilitación de infraestructura vial a través de cuadros de entrada para base, sub-base y pavimento de superficie respectivamente [52]. Este ingreso de información, aunque tiene algún nivel de integración con herramientas CAD (en dos dimensiones) aún requiere un gran esfuerzo del usuario para ingresar datos en los cuadros de diálogo o identificando los elementos de los diseños 2D, lo que puede llevar a errores.

Por otro lado, las calculadoras de software o plugin de BIM automatizan esta entrada de datos en distintos grados, lo que reduce la probabilidad de error y el costo de realizar el análisis. El software reconoce los diferentes elementos del diseño BIM y los asocia con elementos para los cuales existe información de ciclo de vida en la base de datos.

### 3.1.1.1 *Ingreso de cubicaciones*

En todas las herramientas de cálculo en edificación, uno de los datos de entrada más relevantes<sup>4</sup> es la cubicación de los productos de construcción (datos de actividad).

El proceso de cálculo manual de las cubicaciones que se utilizan como dato de entrada a la calculadora requiere dos pasos. En primer lugar, se determinan todas las superficies del edificio. Posteriormente, estas áreas se multiplican con el espesor y densidad de cada producto de construcción [5]. El resultado es la masa total de cada material que se utilizará en la obra.

La mayoría de las calculadoras disponibles son de tipo Excel, donde el usuario tiene que ingresar manualmente las cubicaciones de los materiales (QTOs o BoQ por sus siglas en inglés) [5].

Un sistema más sencillo lo presenta OERCO2, una calculadora de base online gratuita que produce un ACV para edificaciones en Italia, España, Portugal o Rumania [53]. La entrada de datos se hace de forma manual, pero solo sobre los materiales, procesos y sistemas constructivos más comunes de estos países.

Con un nivel de complejidad mayor, la calculadora Athena IE, incluye una lista de materiales y de los impactos ambientales asociados a cada material respectivamente. Los usuarios tienen flexibilidad para agregar materiales, como por ejemplo a través de la importación de su propia lista de materiales desde cualquier programa CAD [51].

Ecómetro permite la entrada de datos a partir de su archivo BC3, un formato estándar de bases de datos de precios y especificaciones para la construcción definido en España y utilizado desde 1996 [54]. La integración se realiza a través de la carga del archivo y es automática. Sin embargo, el usuario debe complementar información relacionada al transporte de los materiales, su origen (reciclado o no) y su permanencia en la edificación (reposición o no). Asimismo, se debe cargar de forma manual la información sobre consumos operacionales de la edificación [55].

La calculadora online gratuita del gobierno belga TOTEM, permite el ingreso de los datos de forma manual o automáticamente con un diseño IFC proveniente de Revit o ArchiCAD (la integración con BIM se está desarrollando) [56]. El ingreso de datos no está limitado a los sistemas constructivos que ya están en la base de datos. El sistema permite la creación de sistemas constructivos paso a paso, como se muestra en la Figura 8.

Esta herramienta incluye funciones de visualización geométrica, para ver exactamente cuál muro de la edificación se está trabajando o incluso para diseñar sistemas constructivos propios del proyecto, como se ve en la Figura 8 [56].

---

<sup>4</sup> En el Estado del Arte de Metodologías para el Levantamiento de Datos de Huella de Carbono se explica que para el cálculo de la huella de carbono se requieren datos de actividad (por ejemplo, la masa total de los productos de construcción) y factores de emisión.

### Edit Element Type External wall cotage (Copy)



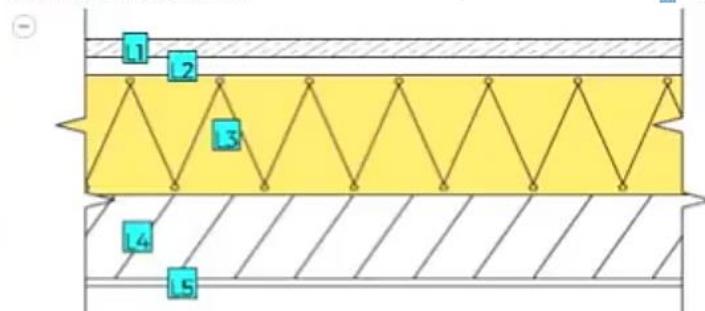
## External wall cotage (Copy)



Name: External wall cotage (Copy)  
 Description:  
 Category: Wall-External Wall

Reference: (21)+  
 Environmental cost: ?

U-value:



**ADD LAYER**

Layer	Materials	New / Existing	m Thickness	W/m.K Lambda	
EXT L1	+ Wall finish, external - closing sub-element - ceramic roofing tile (472x303x31)	New	0.031 193 229	1.345 193 229	
L2	+ Air cavity - 3 cm, horizontal - not ventilated	New	0.03		
L3	+ Thermal insulation, cavity wall - blanket - stone wool - medium hard (40 kg/m³)	New	0.25	0.036 	
L4	+ Outer wall - load-bearing - primary part - blocks/bricks - concrete - dense (290x140x190) incl. mortar (1 cm joint)	New	0.14	1.664 	
INT L5	+ Wall finish, internal - plaster - gypsum plaster on brickwork - by machine (for paint or wall paper)	New	0.01	0.4	
<b>Totals</b>			0.411		

Created 15.2.2018 13:24:41 by Peter Van Daele

CANCEL

APPLY

**SAVE**

Figura 8. Captura de pantalla TOTEM.

La base de datos incluye información de materiales y algunos sistemas constructivos. TOTEM permite montar conjuntos de datos para sistemas constructivos que no estén incorporados aún en el sistema, con los materiales que los componen, como placas de MDF, espacios de aire, aislantes, entre otros. En la Figura 8 se ve la especificación de un muro externo en la herramienta TOTEM. El analista puede definir cada capa del muro por material. Estos materiales se asocian a conjuntos de datos en Ecoinvent 3.3, desde donde se extraen sus emisiones en el ciclo de vida.

OneClick LCA tiene varias integraciones, permitiendo importar directamente los datos de diseño de modelos BIM, modelos de energía (gbXML<sup>5</sup>) o incluso provenientes de planillas Excel. En el caso de IES estas opciones de entrada incluyen además cualquier modelo IFC o SketchUp [57].

En el caso de calculadoras online como deQo, este permite ingresar datos de las cubicaciones de material para cada edificio extraídas del modelo BIM o de la literatura. Las cubicaciones se actualizan constantemente a través de una interfaz online [58].

En el caso de las calculadoras BIM, las cubicaciones se generan automáticamente desde el modelo en el software BIM a partir de los datos albergados en el archivo.

En teoría un ACV se realizaría fácilmente a partir de un modelo BIM. Sin embargo, en la práctica el desafío radica en la alta complejidad que BIM puede alcanzar [5]. Esta complejidad se compone de la amplia diversidad de elementos de construcción y las numerosas bases de datos asociadas a los modelos. El poder de cálculo necesario para trabajar con esos archivos restringe la utilización de este tipo de calculadoras para iteraciones constantes de diseño. Es decir, la aplicación de BIM en las primeras etapas del diseño no es siempre un ejercicio práctico [5].

Para evitar este problema, calculadoras como el *plug-in* Tally, varían el tipo de análisis de acuerdo a la etapa de diseño en la que se encuentre el proyecto como se muestra en la Figura 9.

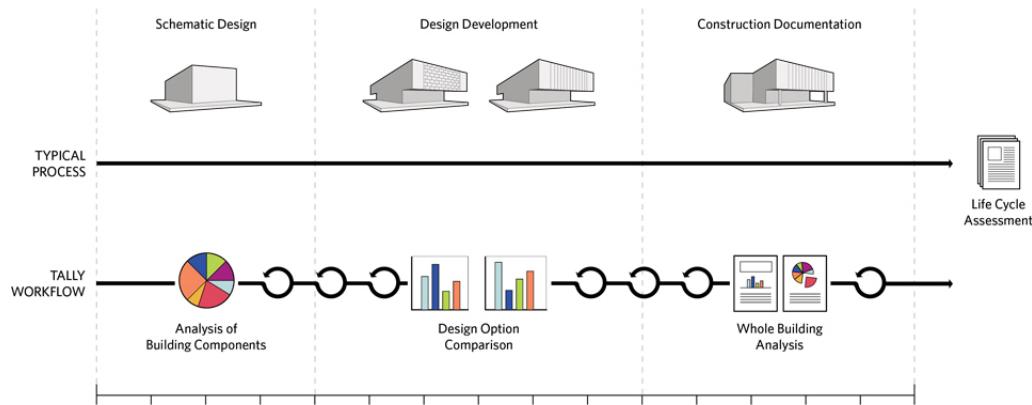


Figura 9. Distintos tipos de análisis realizados por Tally según el estadio de desarrollo del proyecto y documentación disponible en cada etapa [59].

Durante la etapa de anteproyecto, a medida que los usuarios de Tally diseñan sus modelos BIM en Revit, van actualizando una lista de materiales y cubicaciones con la información que tengan disponible. Esta lista de materiales se actualiza automáticamente a medida que cambia el diseño, lo que permite a los arquitectos e ingenieros ver en tiempo real el impacto que tienen sus

<sup>5</sup> XML, eXtensible Markup Language, es un tipo de lenguaje informático que permite a los programas de software comunicar información con poca o ninguna interacción humana. gbXML es un tipo de archivo XML que tiene más de 500 tipos de elementos con los que se pueden describir todos los aspectos de un edificio. El archivo gbXML se guarda desde un software BIM albergando toda la información del edificio y luego éste se importa a otro software para el análisis.

decisiones de diseño en el carbono incorporado en el edificio [59]. En etapas más avanzadas, cuando la mayoría de las decisiones de diseño ya están tomadas, Tally considera elementos estructurales y procesos constructivos, hasta llegar al final del proyecto a realizar el ACV de edificio completo (ACVE).

Otra dificultad que ocurre con BIM es que los modelos normalmente no reconocen todos los sistemas constructivos en detalle. Un modelo BIM puede albergar elementos de hormigón, por ejemplo, pero no tendría en cuenta datos acerca de la enfierradura estructural.

Para evitar esto, las herramientas de *plug-in*, como Tally, agregan otra capa de información: reconociendo materiales que no están modelados en BIM, como el hormigón en sistemas de acero, y tomando en cuenta la amplia gama de clases de materiales de un modelo [59]. En el caso de la herramienta online TOTEM, esta permite el ingreso de nuevos materiales o elementos (como muros, cielos, u otros). Los elementos se diseñan directamente en la herramienta y se asocian a sus materiales estructurales. Además, como el diseño es geométrico, la calculadora hace la cubicación y calcula la transmitancia térmica para modelar la energía operacional [60].

### *3.1.1.2 Entrada de modelos de clima y vida de referencia*

En el caso del ACV de edificio, los datos de entrada incluyen todos los que permitan caracterizar el objeto de estudio, en este caso, el edificio. La amplia variedad de parámetros a utilizar fue revisada en el informe *Estado del Arte de Alternativas Metodológicas para Monitoreo, Reporte y Verificación de Huella de Carbono* y no se incluye exhaustivamente en este documento, aunque sí se presentan algunos ejemplos para retratar puntos principales.

La orientación y ubicación del edificio, junto a su materialidad se asocian a un modelo de clima para estimar la energía operacional. En algunos casos, como Athena IE, este "archivo de clima" es ingresado en la herramienta directamente por el usuario, mientras que en otros casos ya se encuentra incorporado, como en el caso de IES<sup>6</sup> o eToolLCD [61].

Lo mismo ocurre con la vida útil de referencia del edificio. Hay herramientas que determinan por defecto una vida útil dependiendo del sistema de certificación de edificaciones al que se desee enviar los datos, como OneClick LCA. Otras herramientas permiten que el usuario ingrese la vida útil de referencia del edificio, como Athena IE [51] o IES [62]. Éste último permite hasta 80 años de vida útil. Asimismo, las calculadoras pueden solicitar determinar el tipo de edificio del cual se trata, como Athena IE [51].

---

<sup>6</sup> IES es una calculadora cuyo alcance geográfico es Reino Unido, y tiene los datos de clima para este país. Si se desea utilizar la herramienta para construcciones en el extranjero, el usuario debe ingresar su archivo de clima [62].

### 3.1.1.3 Entrada de demanda energética

Con respecto a la demanda energética durante la operación, algunas herramientas integran los coeficientes de utilización de combustibles fósiles asociados a la climatización de espacios, calentamiento de agua, entre otros. Sin embargo el usuario normalmente debe ingresar la demanda de energía calculada externamente a mano. Dos excepciones a esto son Leger y Elodie, que puede calcular internamente la demanda de energía operacional [5].

En el caso de la calculadora Athena IE, se puede incluir una estimación del consumo anual de combustible operativo ingresado por el usuario. El software calcula la energía total, incluyendo la energía de precombustión (la energía utilizada para extraer, refinar y suministrar la energía) y las emisiones a la atmósfera, a los cuerpos de agua y al suelo durante el ciclo de vida del edificio. Otra alternativa en este software, permite al usuario ingresar resultados de la simulación energética para calcular sus efectos operativos junto con los impactos incorporados [51].

### 3.1.2 Análisis de los datos

Una vez que los datos están ingresados en la calculadora, se debe proceder a su análisis, el que tiene dos pasos, los que se explican con el ejemplo de la Figura 10.

1. Cálculo de las *emisiones*: utilizando los datos de actividad (como el consumo de materiales) y los factores de emisión;
2. Cálculo de los *impactos*: donde las emisiones se procesan con su potencial de calentamiento global para generar la huella.

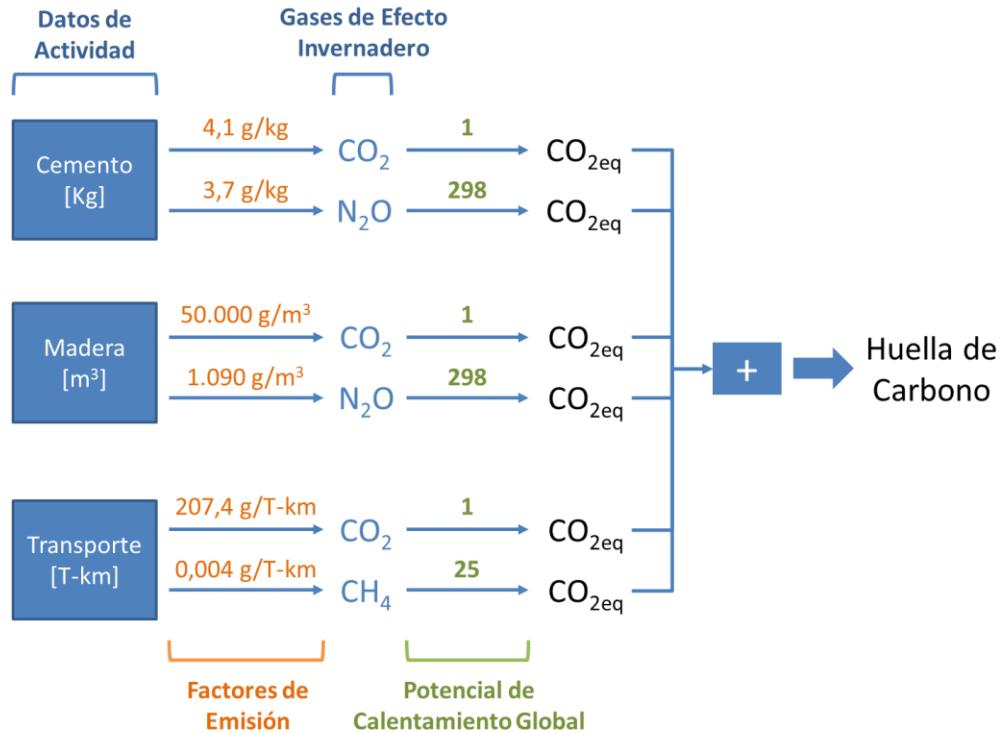


Figura 10. Diferencia entre el cálculo de emisiones y el cálculo de impactos en una huella de carbono.

La principal diferencia entre las herramientas a nivel de análisis de huella de carbono son las bases de datos desde las que extraen los factores de emisión.

En herramientas tipo Excel, se suelen encontrar bases de datos genéricas o producto específicas, como Ecoinvent, mientras que en calculadoras más sofisticadas se pueden encontrar bases de datos exclusivas, con más materiales y conjuntos de datos más precisos para el sitio de construcción.

En el caso de la calculadora Athena Pavement, al igual que en el software Athena IE, este trae incorporadas grandes bases de datos sobre materiales, energía, equipos y transporte. Algunas de estas bases de datos son procedentes del Instituto Athena, y otras son de otras fuentes, como la base de datos ICV de EE. UU. Las entradas de datos de materiales representan promedios nacionales o de la industria para la extracción, procesamiento y fabricación. Las matrices energéticas regionales y las distancias de transporte se aplican como datos promedio [51].

En el caso del sistema de certificación de edificaciones DNGB, cuenta con la base de datos ESUCO LCA, que incluye datos de materiales específicos utilizados en Europa [63] y que están verificados por tercera parte.

Como las calculadoras normalmente están diseñadas para realizar análisis de ciclo de vida, utilizan métodos de análisis más completos, como TRACI, usado por Athena IE. TRACI incluye múltiples categorías de impacto, una de las cuales es el potencial de calentamiento global. Además, informa el consumo de combustibles fósiles [51].

Otro ejemplo de esto es Ecómetro, que utiliza las bases de datos genéricas ELCD 3.2 y Ecoinvent 3.1 para evaluar los impactos de ciclo de vida (etapas A1-B6) en siete categorías de impacto, una de las cuales es el Potencial de Calentamiento Global [55].

Otra calculadora que usa Ecoinvent (versión 3.3) es TOTEM, aunque se prevé el desarrollo de una base de datos de DAP locales [56]. Esta calculadora online calcula automáticamente la transmitancia térmica del muro y otros componentes usando el diseño geométrico y la caracterización de las capas. Con esa información se estima la energía operacional en la vida útil de la edificación [56]. Por el momento la calculadora no considera la reutilización de materiales en otros proyectos, por lo que asocia todo el impacto ambiental de los materiales al proyecto en análisis [56].

### 3.1.3 Datos de salida y reporte

Las calculadoras software suelen incluir formatos de reporte estandarizados que cumplen con los requisitos de los principales estándares y sistemas de certificación de edificaciones (SCEs) internacionales. Estos reportes simplifican los resultados de los informes de ACV tradicional, enfocándose en elementos de diseño que pueden ser cambiados por el equipo de diseño.

A continuación, se mencionan ejemplos y atributos de los informes de resultados:

- Huella de carbono por etapa del ciclo de vida, sistema constructivo y producto de construcción: eToolLCD (ver Figura 11), TOTEM [60].
  - Resultados según indicador de elección: por superficie bruta de la calzada: Athena (Pavement e IE) [51], total de emisiones o la normalización por una unidad funcional módulo ACV de IES, unidades monetarias<sup>7</sup> en TOTEM.
  - Resultados comparables entre edificios y que cumplen con las normas internacionales ISO 14044 y EN 15978 [61]: OneClickLCA, eToolLCD, módulo ACV de IES [62].
  - Otros atributos como recomendaciones, un resumen de inventario de materiales, un gráfico de series de costo y tiempo, el reporte de los impactos más significativos, el inventario de ciclo de vida, y reportes de marketing, entre otros: eToolLCD [61].
- Apoyo para decisiones sobre material o construcción y estrategias de compensación en aplicaciones de la herramienta desde el diseño conceptual hasta etapas de diseño detallado: módulo ACV de IES [62].
- Informes para documentación de SCE específicos: *plug-in* Tally de Revit con informes para LEEDv4 [61] (ver Figura 11).



Figura 11. Ejemplos de reporte de diferentes calculadoras. Izquierda: Tally; Derecha: eToolLCD.

<sup>7</sup> TOTEM logra el reporte en unidades monetarias transformando los impactos ambientales de 17 categorías a dinero con factores de conversión. Estos resultados monetizados se presentan por etapa del ciclo de vida [56].

### 3.1.4 Estrategia de crecimiento

Otras calculadoras en el mundo, como hueCO<sub>2</sub> [64] iniciaron solo con los factores de emisión más importantes para la industria a representar y se basan en una estrategia de *crowdsourcing* para identificar factores de emisión relevantes que aún faltan y sus valores en la literatura.

## 3.2 Revisión Nacional

Las herramientas internacionales revisadas en esta sección son calculadoras de la huella de carbono de ciclo de vida completo que funcionan como asistencia al diseño.

La única calculadora construida en Chile que cumple con esta función es Ábaco (aún en desarrollo). Esta calculadora online tiene como objetivo lograr una evaluación integral de los proyectos de construcción, considerando costos, impactos ambientales y sociales [45]. Dado que es la única calculadora comparable a las cubiertas en la sección internacional, se tratará en una sección independiente.

Adicionalmente se incluyen ejemplos de otras calculadoras en temas relacionados, como las calculadoras de eficiencia energética, cuyos modelos se integran al de una calculadora de huella de carbono de edificación, y el programa Huella Chile, como ejemplo de una calculadora de huella de carbono nacional. Esta última se utiliza para medir huellas corporativas, que incluyen el carbono operacional de las empresas. En estos casos también se revisan los elementos de entrada, cálculo y reporte.

Finalmente, se revisa la adopción de nuevas tecnologías, como BIM, en el sector de la construcción nacional. Este factor también debe ser considerado para la implementación exitosa de calculadoras de huella de carbono a nivel de edificación.

### 3.2.1 Ábaco Chile

La herramienta Ábaco Chile es una calculadora online que permite el cálculo integrado de costos económicos y sociales (asociados a la mano de obra) bien como de los impactos ambientales de un proceso constructivo. Las bases de costos son empleadas de forma generalizada [65] en el sector. Por eso, al incorporar el cálculo de costos, Ábaco Chile busca integrarse en la etapa de diseño y facilitar la incorporación de variables ambientales durante esta etapa [66].

La calculadora permite la clasificación de recursos y actividades, describir especificaciones técnicas y enlazar objetos BIM [66]. Estas entradas se asocian con tres bases de datos internas que se interconectan para calcular los costos de materiales y de servicios y los impactos ambientales.

La base de datos de impactos ambientales contiene dos categorías de impactos: energía incorporada y huella de carbono. Los impactos ambientales consideran las etapas de "cuna a la puerta" y son basados en Ecoinvent 3.0, con adaptación para la matriz energética chilena [66].

Las otras dos bases de datos proveen la información de costos de materiales y de actividades comúnmente usadas en proyectos de construcción, lo que posibilita el análisis de precio y de costos sociales.

La calculadora reporta los parámetros económicos, sociales y ambientales por material/actividad, lo que permite tomar decisiones en etapas tempranas de diseño. Esto también permite trazabilidad de estas variables y fortalecer la incorporación de parámetros ambientales en licitaciones a proyectos públicos y privados de construcción en Chile [66].

### 3.2.2 Calculadoras de Eficiencia Energética

Ábaco Chile es capaz de calcular el carbono incorporado, pero aún no tiene capacidad de proveer la huella de carbono operacional. Para eso, se analizan las calculadoras de eficiencia energética que reportan la demanda energética, un insumo esencial para calcular el carbono operacional.

Las calculadoras de eficiencia energética en Chile son del formato Excel y están asociadas a los programas Calificación Energética de Viviendas (CEV) y Certificación Edificio Sustentable (CES).

La calculadora de CES sólo es capaz de estimar la transmitancia de los materiales. Para estimar la demanda efectiva y su reducción comparada a un caso base, el manual hace referencia a otras calculadoras de simulaciones dinámicas tales como TAS, DesignBuilder y EnergyPlus, entre otras [67]. Por lo tanto, esta calculadora no es suficiente para estimar la demanda operacional.

Por otro lado, la calculadora de CEV tiene incorporado un simulador de demanda energética dinámica que, ingresando los datos arquitectónicos y de materiales, es capaz de evaluar el consumo energético de una vivienda. La calculadora es basada en tres archivos en formato Excel llamadas *planillas de balance térmico dinámico* (PBTD), que usan la norma chilena NCh 1079 sobre zonificación climático habitacional [68] para incorporar las variables climáticas de acuerdo a la ubicación geográfica de la vivienda. En conjunto, las planillas evalúan la temperatura al interior de la vivienda con base en los flujos de las distintas variables de entrada [69].

El usuario tiene que ingresar los materiales y elementos de la envolvente y datos arquitectónicos de la vivienda, como características de muros, puertas y ventanas. La planilla ya presenta un listado con elementos constructivos por defecto en que el usuario puede incorporar sus propias entradas. Luego, otra planilla se basa en las variables de entrada para evaluar el balance térmico y la temperatura interior cada 60 segundos. Existe la opción de hacer el cálculo solo o comparado con un caso base de referencia. Finalmente, los resultados de demanda de energía son enviados para la última plantilla en que el usuario debe ingresar los datos de los equipos transformadores de energía para obtener los resultados de consumo de energía.

### 3.2.3 Huella Chile

Huella Chile es una calculadora online abierta y gratuita para la estimación de la huella de carbono corporativa u organizacional, operada y mantenida por el Ministerio de Medio Ambiente. Ya lleva más de 7 años de operación y más de 1000 empresas inscritas. La calculadora permite que el usuario elija libremente los procesos que integrará al cálculo y el ingreso de los datos de actividad (normalmente datos primarios). Esta libertad se balancea con el requerimiento de verificación independiente para optar a los sellos del programa.

El sistema tiene una base de datos con factores de emisión y potenciales de calentamiento global. Dado que los factores de emisión se actualizan año a año, es preferible que la calculadora tenga interfaz de usuario y de administrador, de forma de facilitar los cambios<sup>8</sup>.

Los resultados son entregados en un informe automático modificable para agregar la imagen corporativa de la empresa.

### 3.2.4 Digitalización en el sector construcción

El desarrollo de calculadoras para evaluar el impacto ambiental de los proyectos y su integración a los procesos de diseño en la industria AECO se inserta dentro de los procesos de digitalización del sector construcción. En esta sección se explicará brevemente en qué consiste esta tendencia, su impacto en los procesos de diseño y las brechas identificadas en estudios precedentes con el fin de caracterizar un marco de referencia para la adopción masiva de este tipo de calculadoras.

La transformación digital o digitalización, se refiere a "un cambio radical en la ejecución de procesos y entrega de productos/servicios a las personas, adaptándose a las necesidades de éstas y haciendo uso inteligente de las tecnologías disponibles, cuyo costo es cada vez menor"[7]. En el sector de la construcción, recibe el nombre de cuarta revolución industrial del sector construcción, o Construcción 4.0 y se define como "un cambio de paradigma bajo el cual la obra se transforma en una fábrica productiva en la que se 'elaboran' productos a través de medios productivos (maquinaria), mediante métodos organizados (proyectos) que permiten incorporar nuevas tecnologías, y que puede incrementar la productividad en el sector entre 5% a 10%"[2].

La digitalización de la construcción para mejorar la productividad se caracteriza por la adopción de tecnologías, políticas y procesos en la etapa de diseño, construcción y operación. Dentro de estas tecnologías destacan la modelación de información de edificios (BIM por su sigla en inglés), la fabricación digital, la realidad aumentada, Internet de las cosas (IoT), blockchain, la nube de computación móvil y el análisis integrado del impacto ambiental de la edificación entre otros [70].

En este contexto se destaca BIM: la representación física y funcional de las características de una edificación o infraestructura. BIM sirve como una plataforma de conocimiento compartido, conformando una base confiable para gestionar el proyecto a lo largo de su ciclo de vida desde su diseño [71].

El proceso de adopción de las tecnologías BIM conlleva una serie de beneficios para la industria que se traspasan a otros participantes en etapas sucesivas de la *cadena de producción* [72]. Entre estos, destaca facilitar la coordinación temprana entre los distintos actores involucrados en un proyecto de construcción<sup>9</sup>, la incorporación de algunas reglas o directrices de diseño en los software, además de la disposición de librerías con objetos predeterminados que ayuda significativamente a generar proyectos de diseños racionalesizados con productos que ya están en

---

<sup>8</sup> Conversación personal con Huella Chile. Enero, 2020.

<sup>9</sup> Un aumento de la inversión de 2% en implementación BIM durante las fases iniciales de un proyecto, podría generar un ahorro de alrededor de 20% en los costos totales [6].

el mercado [73]. Los mayores provechos derivan de los cambios organizacionales y nuevos flujos de trabajo que son gatillados por la adopción de estas tecnologías [72].

En Chile, desde el año 2016, el programa “Construye 2025”, impulsado por CORFO ha sido el principal promotor de iniciativas la innovación del sector<sup>10</sup>. El objetivo de este programa es integrar bienes y servicios en todas las etapas del ciclo de vida a lo largo de la cadena de valor de un proyecto de la edificación en el sector comercial, público y residencial (CPR), desde suministro de materiales hasta el fin de la vida útil [74]. Este objetivo se apoya en cuatro pilares estratégicos: el proceso de digitalización de la industria de la construcción, la industrialización, la innovación y mejora continua (I+D+i+e) y la construcción sustentable<sup>11</sup>.

A través de la transformación digital, se estima que dentro de 10 años la digitalización a gran escala en Chile podría ayudar a las empresas a obtener entre 20% a 30% de aumento en los márgenes de operación [74].

A pesar de los beneficios demostrados de la incorporación de la tecnología BIM al sector, se identifican una serie de brechas estructurales, educacionales y tecnológicas a su adopción masiva. En Chile, se destacan:

- Brechas estructurales, tales como la falta de estandarización y la baja coordinación y colaboración en procesos constructivos;
- Brechas tecnológicas, como el alto costo de herramientas tecnológicas y la baja disponibilidad de librerías BIM;
- Brechas educacionales, como el desconocimiento de BIM a nivel transversal en la cadena de valor de la construcción y baja oferta de cursos sobre BIM a nivel técnico, de pregrado y para empresas [75].
- Brechas organizacionales, tales como la necesidad de un cambio organizacional profundo y la falta de seguimiento de costos de implementación o retorno de la inversión [72].

Las dificultades para la adopción de BIM en el sector de la construcción nacional, son relevantes para introducir cualquier tecnología nueva en el sector. Por lo tanto, para la adopción exitosa y masiva de una calculadora de huella de carbono se requiere una alta integración con los procesos actuales de desarrollo de proyectos constructivos, que no demanden un cambio organizacional significativo. Además, es importante que haya un balance de oferta y demanda para el uso de la tecnología, bien como un retorno claro para las empresas que la implementen.

---

<sup>10</sup> El sector de la construcción es el menos innovador y desarrollado en Chile, a su vez, medido con países OCDE, es la que menos se ha insertado en la transformación digital.

<sup>11</sup> Dentro de los indicadores operativos para evaluar el cumplimiento de la hoja de ruta del programa Construye 2025 se incluyen la penetración del uso de BIM en el mercado y la oferta de servicios de consultoría en sustentabilidad [99].

### 3.3 Diagnóstico del capítulo

Las calculadoras de edificaciones son herramientas complejas e interconectadas que dependen de una gran cantidad de datos, como los impactos ambientales de los materiales y procesos constructivos, los modelos de clima, modelos de impacto ambiental y listas de materiales usados.

Un aspecto que parece ya estar resuelto en Chile es el de los modelos de clima. Chile cuenta con un estándar que define la "Zonificación Climático Habitacional para Chile y Recomendaciones para el Diseño Arquitectónico" [68] y calculadoras basadas en Excel de alta complejidad, como la planilla de balance térmico dinámico (PBTD) [76]. Ésta permite una completa simulación de la demanda energética de la vivienda, basada en los materiales, orientación y clima del lugar específico donde será construida. Éste es un componente necesario para calcular la huella de carbono operacional, pero no considera el carbono incorporado.

En el campo del carbono incorporado se están realizando avances. ECOBASE (descontinuado) y los programas de declaración ambiental de productos (DAP) han logrado la generación de una pequeña base de información nacional. Actualmente Ábaco está utilizando bases de datos genéricas (Ecoinvent) y los datos de ciclo de vida para la matriz energética nacional para apoyar el cálculo de los impactos ambientales de la construcción a través de sus partidas de presupuesto.

A nivel internacional, el mercado de las calculadoras de impactos ambientales para la edificación es dinámico e incluye una amplia gama de herramientas. La mayoría de estas se enfocan en *orientar las decisiones de diseño* facilitando el proceso de cálculo y cambio de variables. En estas calculadoras se puede encontrar bases de datos genéricas, producto específicas o basadas en DAP como apoyo para la inclusión de los impactos de los materiales y procesos de la construcción.

La complejidad de las calculadoras varía según su propósito y funcionalidades. En el tiempo estas calculadoras han pasado desde sistemas basados en Excel a de base online o software de alta complejidad, y muchas veces, alto costo. Las más sencillas son usadas para fines educacionales o de sensibilización mientras que las más complejas se usan integradas con software de diseño de edificaciones, como OneClick LCA o TOTEM.

Gracias a la digitalización, esas herramientas podrían ser integradas a los procesos constructivos chilenos, siempre y cuando estos trabajen en formatos que se puedan integrar a las herramientas.

Esta integración puede verse demorada en el país por el costo de transición entre los procesos actuales de las empresas y los procesos con los que se diseñaron las calculadoras. Un ejemplo básico de esto está al nivel de vocabulario: en Chile la etapa de *anteproyecto* se puede llamar diseño esquemático o prediseño y aunque parecidos, estas etapas no son equivalentes al anteproyecto definido en los softwares. Asimismo, los productos no tienen nombres estandarizados, lo que aumenta las posibilidades de error o confusión en los usuarios. Estas barreras lingüísticas dificultan la utilización de calculadoras. A eso se suma el desafío de la digitalización, donde la evidencia sobre la adopción de BIM ofrece lecciones que aprovechar.

Para asegurar el uso masivo de las calculadoras por los equipos profesionales en la industria AECO, estas deben incorporarse de forma efectiva al proceso de diseño. Para lograr esto, las calculadoras de huella de carbono requieren como funcionalidades: enlace a las herramientas 3D de la industria para la entrada de las características principales de la geometría, cálculo de la demanda de energía operacional y posibilidad de optimización a través de la iteración de los distintos diseños [5]. Se observa que no existe una sola calculadora que las proporcione todas.

En este sentido, se observa también que la penetración de mercado de estas herramientas está asociada a exigencias de sistemas de certificación de edificaciones (SCE), como por ejemplo, la producción de DAP o ACV de construcción para cumplir con créditos LEED o de otros SCE. Asimismo, la herramienta Ábaco en Chile tiene como meta ofrecer información comparable para licitaciones públicas o privadas, un gran incentivo para la industria.

Finalmente, durante la revisión se encontraron múltiples herramientas descontinuadas o con actualización muy poco frecuente, como asPECT 3.1 (software año 2010), ENSLIC Building (basada en Excel año 2010) o las múltiples calculadoras ofrecidas de forma gratuita por GHG Protocol (basada en Excel, algunas desde 2004) o la calculadora online Sofias (año 2014) del gobierno español. La característica común de todas ellas es que el acceso es gratuito.

En Chile, la plataforma Ábaco (de uso gratuito) está siendo desarrollada por académicos con apoyo estatal, lo que introduce un desafío adicional a su supervivencia en el largo plazo: su modelo de financiamiento y mantención.

### **3.4 Conclusión del capítulo**

Actualmente en Chile hay experiencia en la producción de modelaciones de energía operacional funcionales y conocidas en el mercado, que pueden ser la base para estimación del carbono operacional (ej.: CEV). De forma separada, está en desarrollo una herramienta para cálculo del carbono incorporado para uso durante las etapas tempranas de diseño (Ábaco). El principal desafío es asegurar la adopción por la industria AECO, teniendo en cuenta las dificultades del sector en adoptar nuevas tecnologías. Para eso, un gran incentivo es la exigencia de uso de los resultados de la calculadora en sistemas de certificación o licitaciones.

La integración de las calculadoras existentes en Chile requerirá un esfuerzo mancomunado y coordinado de los actores públicos, privados y la academia. Para facilitar la transición, es óptimo que las calculadoras se incorporen naturalmente en el proceso de diseño a través de integraciones con las herramientas usadas actualmente. Otra alternativa es una calculadora con funcionalidades ya adoptadas por la industria más allá del cálculo de impacto ambiental, como el cálculo de presupuesto de materiales y servicios.

En conclusión, es importante asegurar la sostenibilidad de una calculadora. Esto depende de su modelo financiero, el que puede ser gratuito, siempre que exista un financiamiento que permita la actualización, mantención y adaptación de la herramienta para atender las necesidades de la industria en el tiempo.

## 4 Aplicación Sectorial

Hasta el momento se han revisado calculadoras para la huella de carbono incorporado de productos, las que se integran en calculadoras para la huella de carbono de edificaciones. Estas calculadoras realizan la huella de manera simplificada con el fin de reducir el tiempo de un estudio convencional.

La agregación de estos resultados puede entregar líneas base o puntos de referencias (*benchmarks*) sectoriales.

La industria AECO tiene una larga tradición en el desarrollo de líneas base para clasificar la edificación de acuerdo a su demanda energética [77], lo que ha permitido mejorar significativamente el desempeño energético de las edificaciones[78]. Sin embargo, el desarrollo de las líneas base para la huella de carbono en edificación es aún incipiente. Con el objetivo de producir las reducciones de carbono necesarias para lograr un sector carbono neutral, es necesario mejorar el consumo de los datos y puntos de referencia establecidos [79].

A pesar de que los métodos de ACV y huella de carbono se utilizan cada vez más en el sector AECO, todavía no existe consenso para establecer la línea base del carbono incorporado de los edificios [80].

Para abordar esta brecha de conocimiento han surgido una serie de esfuerzos sectoriales para permitir establecer líneas base. En esta sección se analizan algunas de ellas.

### 4.1 Revisión internacional

#### 4.1.1 Políticas públicas

A nivel sectorial el GHG Protocol ofrece dos estándares con sus herramientas asociadas. Uno es el estándar de objetivos de mitigación, que ayuda a contabilizar y generar reportes para objetivos de reducción de gases de efecto invernadero nacionales y regionales [81]. El otro es estándar de política y acción, que ayuda a evaluar los cambios de gases de efecto invernadero resultados de políticas y acciones [82].

Ambos tienen herramientas de apoyo que sirven como un proceso paso a paso de la aplicación de los estándares. Estas herramientas no calculan las emisiones de las políticas o acciones per se, sino que sirven más como un marco ordenador del desarrollo de la meta o la acción.

El estándar de política y acción tiene una guía especial para la definición de políticas y acciones en edificios comerciales y residenciales con ejemplos puntuales de políticas para este sector y la forma de ingresarlas en la herramienta de apoyo [83].

#### 4.1.2 Interpretación de los resultados de huella de carbono

Como fue mencionado en la Revisión del Estado del Arte de las Metodologías para el Cálculo de Huella de Carbono en la Construcción, los resultados de huella de carbono suelen compararse con *benchmarks* de forma de facilitar la interpretación.

Las calculadoras de huella de carbono utilizan variadas comparaciones, como la equivalencia de los resultados con kilómetros recorridos, árboles plantados o las emisiones promedio de una persona por año.

La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos tiene una calculadora de equivalencias de carbono que puede servir como fuente para la producción de benchmarks en una calculadora de edificaciones [84].

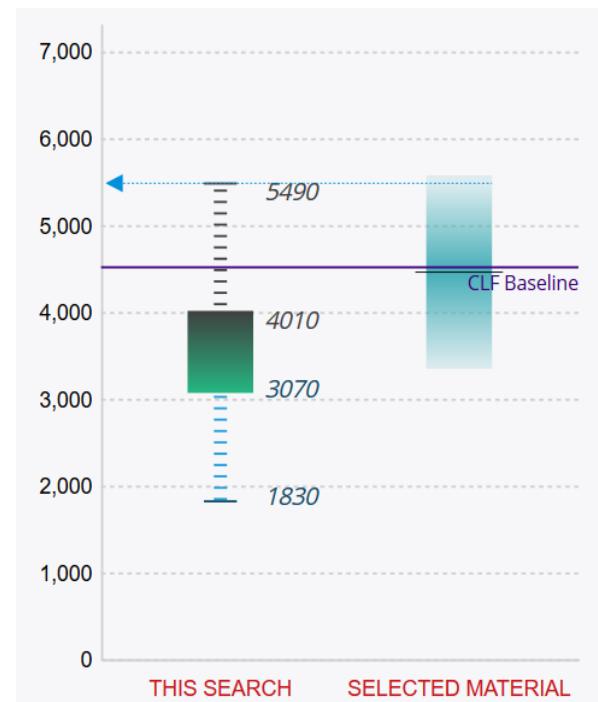
Para benchmarks profesionales, se puede utilizar la calculadora gratuita EC3, una iniciativa de más de 50 empresas lideradas por el Carbon Leadership Forum [85]. La iniciativa busca facilitar la comparación de desempeño ambiental de productos y edificaciones haciendo que las DAP sean más accesibles, más fáciles de comparar y permitiendo al usuario una mejor noción de sus incertidumbres [16].

La herramienta EC3 permite visualizar el carbono incorporado para los siguientes sistemas constructivos:

- Sistemas estructurales: hormigón, acero, madera
- Sistemas envolventes: aluminio, vidrio, aislación
- Sistemas de terminaciones: alfombras, tejas, paneles de yeso

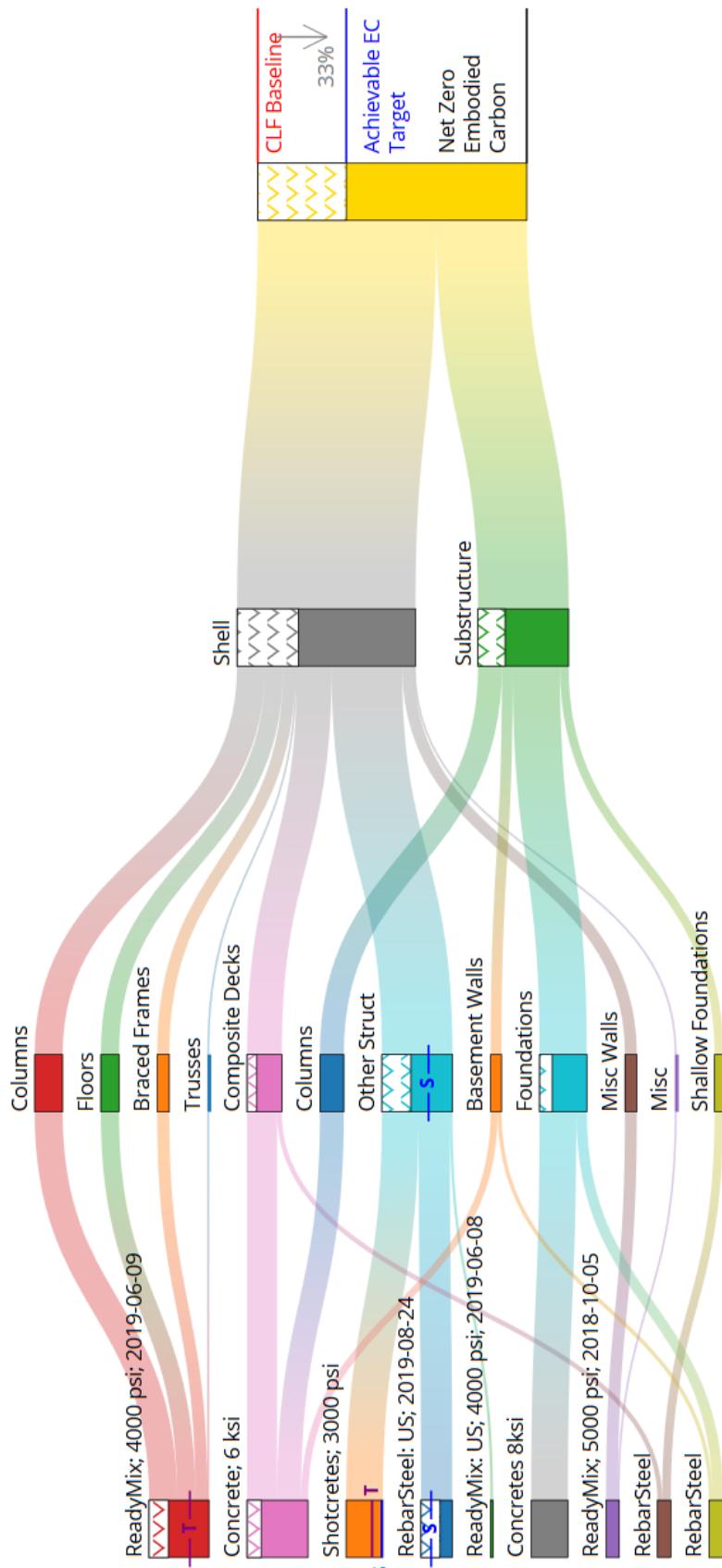
Una característica llamativa de EC3 es que transparenta el nivel de incertidumbre y la variabilidad del material, como se ve en la Figura 12. En la barra izquierda se muestran las huellas de carbono de DAP para varios productos de la misma categoría. En la caja, los valores entre el 20% y el 80% de las DAP. A su lado se muestra la huella de carbono para el material seleccionado [86]. De la misma forma la herramienta ofrece sugerencias de qué metas de carbono son alcanzables por material, correspondientes a la huella en el primer quintil de los materiales de esa categoría [87].

A nivel de edificación, EC3 permite determinar un “presupuesto de carbono” para el proyecto y junto con ello objetivos. Con las cubicaciones muestra rápidamente la contribución de cada material y elemento al presupuesto de carbono, como se ve en la Figura 14.



*Figura 12. Comparación en gráfico de caja para huella de carbono para planchas de volcánita (según DAP). Izquierda: todas las planchas en registro. Derecha: una plancha seleccionada.*

**Bob's Tower #2, California, 2021**



*Figura 13. Diagrama de Sankey en la EC3 indicando la ponderación de cada producto de construcción en el proyecto total [16].*

### Using the EC3 Tool: A Structural Use Case

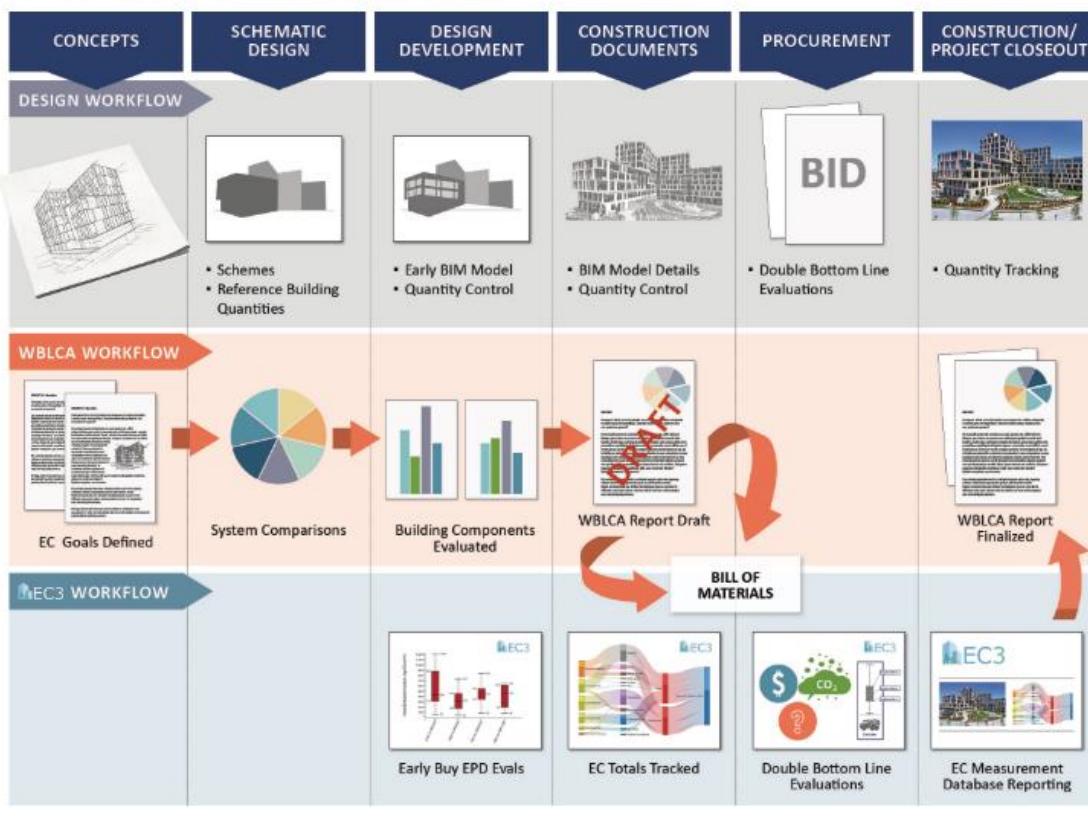


Image developed by Magnusson Klemencic Associates

Figura 14. Flujo de información en la calculadora EC3 como complemento al flujo de información en el proceso de diseño y del ACV de edificio completo (Imagen de MKA en [16]).

Actualmente la calculadora EC3 se enfoca en las etapas A1 a A3 (cuna a la puerta) de un material. En el futuro, se espera que la herramienta EC3 incorpore otras etapas como A4 a D [16].

Otro objetivo a largo plazo de la calculadora EC3 es alimentar una base de datos de DAP de última generación, que incluye evaluaciones estadísticas de incertidumbre de los datos en DAP. Estas evaluaciones se integrarán en las calculadoras de edificación completa actuales y futuras [16].

## 4.2 Revisión nacional

La aplicación más cercana de un repositorio centralizado nacional es el Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC). Es una plataforma de datos abierta con el fin de capturar, sistematizar, analizar y difundir la información sobre emisiones de contaminantes, objetos de una norma de emisión [88].

Inicialmente, los servicios públicos con convenio de colaboración traspasaban las bases de datos sectoriales a un nodo central del RETC. El organismo responsable por el sistema sistematizaba los datos y producía los informes anuales.

Sin embargo, este sistema presentaba perdida de información, duplicidad de registros, problemas de homologación de datos, entre otros inconvenientes. Esto propulsó a la implementación de la

Ventanilla Única, que es un formulario único de acceso y reporte para concentrar la información en una base de datos centralizada. El flujo de información antes y después de la ventanilla única es mostrada en la Figura 15.

La ventanilla única otorgó múltiples beneficios para varios actores:

- Instituciones públicas: mayor coordinación y eficiencia en la gestión ambiental;
- Industrias: simplificando la entrega de información;
- RETC: mayor calidad y autonomía de los datos.

El sistema del RETC tuvo un impacto tan importante en la gestión ambiental del país que los principales instrumentos de políticas públicas están soportados bajo esta plataforma, como planes y normas ambientales, impuestos verde y la ley de responsabilidad extendida del productor.

Un impulso importante para la creación del RETC fueron los compromisos internacionales asumidos por Chile en acuerdos de libre comercio y para el ingreso a la OCDE. Además, su adopción se fortaleció bajo leyes que establecen sanciones por incumplimiento de informar y falsas declaraciones [89].

Por fin, una base de datos unificada y públicamente disponible puede ser usada por la academia y organizaciones para estudios comparativos entre sectores, evitando la duplicación de esfuerzos. Esto cambiaría la situación actual, donde múltiples trabajos científicos y técnicos quedan aislados y por lo mismo no son aprovechados en otras iniciativas.

Con datos de huella de carbono de productos, estos estudios son relevantes para el análisis de impacto y factibilidad para el desarrollo de materiales menos contaminantes para todo el sector [90], [91].

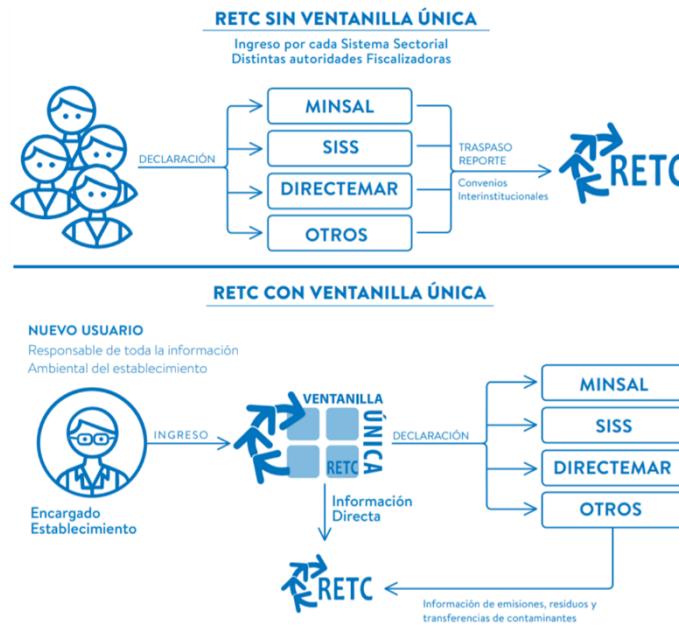


Figura 15: Flujo de información de RETC antes y después de la implementación de la Ventanilla Única. Fuente [89]

### 4.3 Diagnóstico del capítulo

En Chile ya existe una solución tecnológica junto a un marco legal de colecta centralizada de datos de contaminantes. Debería ser posible integrar bases de datos de factores de emisiones y potencial de calentamiento global para los contaminantes ya contabilizados de forma que sean incorporadas naturalmente en el flujo de reporte de las empresas.

Junto a eso, también existen compromisos internacionales asociados a acuerdos de comercio, a la OCDE y al acuerdo de Paris que demandan la recolección y publicación de información sobre gases de efecto invernadero. Estos compromisos pueden ser usados como catalizadores para impulsar la creación de políticas públicas asociadas a incentivos de reporte por parte de la industria y obligación de gestión por parte de los organismos públicos.

Con la implementación de este sistema centralizado, sería posible crear *benchmarks* nacionales para el sector y potenciar el desarrollo científico de soluciones más sustentables para la edificación.

### 4.4 Conclusión del capítulo

La aplicación sectorial de calculadoras de huella de gira alrededor de análisis del impacto de políticas públicas, creación de *benchmarks* para comunicación e interpretación efectiva de los resultados y centralización de los datos para producción de informes y estudios.

Chile posee las condiciones tecnológicas y políticas para fortalecer su marco legal en dirección a la adopción de una base centralizada de huella de carbono.

## 5 Diagnóstico General

### 5.1 Identificación de brechas

La mantención y actualización se alzan como brechas a la sostenibilidad de las calculadoras de huella de carbono. Esto está fuertemente asociado a una fuente de recursos estable que permita generar un equipo alrededor de la calculadora. En el caso de las calculadoras chilenas, esto se ve reflejado en los ejemplos de RETC y Huella Chile, que avanzan hacia su primera década de funcionamiento versus ECOBASE, que fue descontinuada poco después de terminar el proyecto que la generó.

La fuente de recursos financieros es solo una parte del modelo de sostenibilidad, también debe existir una institucionalidad (mandato) para mantener la calculadora, especialmente si es de origen gubernamental, como se discutió en el Estado del Arte de sistemas de MRV.

Otro aspecto vital para la calculadora es su adopción. Se ha discutido que el mercado de la construcción chileno tiene formas de trabajo diferentes a las de otros países que podrían estar limitando la adopción de herramientas como BIM, incluso cuando su uso supone márgenes de ganancia de 20 a 30% superiores [74], en una industria que compite por precio.

Los sistemas de certificación de edificaciones, como LEED, son un fuerte incentivo para el uso de calculadoras de ciclo de vida en el extranjero [92]. En Chile, Ábaco expresa su funcionalidad para comparar desempeño ambiental para licitaciones. Ambos ejemplos constituyen incentivos del tipo "market pull", es decir, una exigencia que hacen los compradores hacia los productores. Básicamente, se trata de aumentar la competitividad de la industria midiendo y comparando su desempeño ambiental con el de sus competidores.

Una brecha endémica de América Latina es la escasez de datos locales de ciclo de vida para los productos. Si bien en Chile existe actividad académica generando investigación y resultados sobre huella de carbono en el ciclo de vida de productos, los investigadores estructuran los estudios de formas diferentes (aunque siempre en el marco de la ISO 14044), lo que hace difícil las comparaciones. Por el momento el único programa de DAP vigente en el país, The International EPD System tiene menos de 10 DAP publicadas, en dos categorías de productos: cemento y acero.

### 5.2 Identificar metodologías más aplicables a la realidad nacional

#### 5.2.1 Modelo de sostenibilidad de la calculadora

Los factores de emisión y potenciales de calentamiento global (GWP) van cambiando en el tiempo por lo tanto se requiere un equipo dedicado para la mantención de la calculadora y la promoción de su utilización.

La experiencia internacional indica que el financiamiento es necesario, ya sea desde los propios usuarios, en aquellas calculadoras que son de pago, como del gobierno u organizaciones en las calculadoras gratuitas.

En Chile, tanto el financiamiento como la institucionalidad podrían vincularse al nuevo marco normativo de cambio climático, asociándolo con la actividad académica.

Asimismo, se pueden actualizar los factores de emisión del Sistema Eléctrico Nacional directamente desde el Ministerio de Energía.

### **5.2.2 Disponibilidad de datos**

Varias de las herramientas comentadas en este informe utilizaron un modelo progresivo para poblar sus bases de datos con información más precisa. Se puede comenzar utilizando bases de datos genéricas, producto-específicas, locales (Mexicanuh, SICV), en base a DAP u otras y con el tiempo mejorar la precisión de los datos.

La producción de datos se podría incentivar con financiamiento público, como en el caso de ECOBASE o a través de líneas de investigación específicas para la academia. Programas como FOCAL de CORFO podrían apoyar la verificación de DAP para la industria, subsidiando el costo de realizar esta actividad.

Por supuesto, la existencia de sistemas de certificación de edificaciones en el país que soliciten la producción de DAP son un incentivo. Ejemplos de esto son LEED, CVS o CES.

A nivel sectorial, la cooperación interinstitucional serviría para alimentar la calculadora con datos actualizados, como la huella de carbono de la electricidad en el Sistema Eléctrico Nacional, que es reportada por el Ministerio de Energía de forma regular.

## 6 Conclusión

La estimación de la huella de carbono en el ciclo de vida de una edificación es un proceso complejo y que requiere una gran cantidad de datos de fuentes diversas. Debido a que la mayoría de los profesionales AECO no tiene conocimiento en ACV y tampoco el tiempo ni financiamiento para el desarrollo de estudios detallados, es necesario simplificar el proceso. Se requieren calculadoras fáciles de entender y que permitan la aplicación sin un amplio conocimiento y experiencia en ACV. El proceso de entrada de datos debe ser simplificado y los datos deben restringirse a los aspectos más relevantes en la caracterización del objeto de análisis.

En esta línea se ha desarrollado una enorme variedad de calculadoras para el cálculo de huella de carbono y análisis de ciclo de vida (ACV) de productos de la construcción y edificaciones. Prácticamente todas estas herramientas están enfocadas en apoyar la etapa de diseño del edificio, donde se puede hacer la mayor cantidad de cambios al menor costo. En todo lo demás, las calculadoras son muy diferentes.

Estas calculadoras varían en su base tecnológica (Excel, Software, online o plug-in de BIM), los datos que requieren del usuario y los que traen integrados, los métodos de cálculo y la forma en que entregan los resultados. Además, difieren en su costo y facilidad de integración con otras herramientas.

La adopción de calculadoras está relacionada a su capacidad de integrarse a los flujos de trabajo que ya se dan en el sector AECO. En Chile estos flujos de trabajo son diferentes que en el extranjero, lo que afecta la incorporación de nuevas herramientas en el sector.

El sector público y los gremios pueden tener el protagonismo en la producción de datos de huella de carbono en el ciclo de vida de los productos y edificaciones a través de iniciativas sectoriales para aumentar la competitividad. Algunos ejemplos de esto son la calculadora GCCA para el cemento, los sistemas de certificación de edificaciones y los repositorios masivos de información como EC3.

El sector AECO se verá impulsado por estas iniciativas a incorporar nuevos flujos de trabajo y herramientas que le permitan diferenciarse en licitaciones (como en el caso de Ábaco) y acceder a certificaciones.

Esta necesidad de información motiva a su vez al sector de los productos de la construcción a generar más declaraciones ambientales de productos (DAP).

Con el paso del tiempo se generará información cada vez de mayor calidad, mejorando las estimaciones de huella de carbono y retroalimentando las políticas públicas para lograr la carbono neutralidad de este sector al 2050.

## Referencias

- [1] L. Wastiels and R. Decuypere, "Identification and comparison of LCA-BIM integration strategies," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 323, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1755-1315/323/1/012101.
- [2] Centro Tecnológico para la Innovación (CTec), "La cuarta revolución industrial llega al sector construcción en Chile," 2018. [Online]. Available: <https://ctecinnovacion.cl/la-cuarta-revolucion-industrial-llega-al-sector-construccion-en-chile/>. [Accessed: 06-Mar-2020].
- [3] PlanBIM, "Estándar BIM en proyectos públicos: Intercambio de información entre Solicitante y Proveedores," Santiago, Chile, 2019.
- [4] WGBC, "Bringing embodied carbon upfront," London, 2019.
- [5] A. Hollberg, J. Ruth, and A. Hollberg alexanderhollberg, "LCA in architectural design-a parametric approach," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 21, pp. 943–960, 2016, doi: 10.1007/s11367-016-1065-1.
- [6] Cámara Chilena de la Construcción (CChC), "El Sector de la Construcción ante el Desafío Climático Global," 2019.
- [7] Gobierno de Chile, "Estrategia de Transformación Digital del Estado," Santiago de Chile, 2020.
- [8] Ministerio de Vivienda y Urbanismo MINVU, "Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC) - Disposiciones Generales - Normas de Competencia y Definiciones," 1992. [Online]. Available: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=8201>. [Accessed: 06-Mar-2020].
- [9] "Life Cycle Terminology – Life Cycle Initiative." [Online]. Available: <https://www.lifecycleinitiative.org/resources/life-cycle-terminology-2/#d>. [Accessed: 02-Mar-2020].
- [10] gbXML, "About gbXML," 2020. [Online]. Available: [https://www.gbxml.org/About\\_GreenBuildingXML\\_gbXML](https://www.gbxml.org/About_GreenBuildingXML_gbXML). [Accessed: 04-Mar-2020].
- [11] US EPA, "Understanding Global Warming Potentials | Greenhouse Gas (GHG) Emissions | US EPA," *US EPA*, 2020. .
- [12] Instituto Nacional de Normalización (INN), "NCh 3423:2017. Sostenibilidad en la construcción - Declaración ambiental de productos de construcción," Santiago, 2017.
- [13] A. Lewandowska *et al.*, "Between full LCA and energy certification methodology-a comparison of six methodological variants of buildings environmental assessment," *Build. Components Build.*, vol. 20, pp. 9–22, 2014, doi: 10.1007/s11367-014-0805-3.
- [14] K. Strobel, "(Mass) Timber: Structurally Optimized Timber Buildings," University of Washington, 2016.
- [15] C. DeWolf, "deQo Database of Embodied Quantity Outputs," *MIT Building Technology*

*Program*, 2018..

- [16] Carbon Leadership Forum (CLF), "EC3 Tool: Primer for AEC Professionals."
- [17] S. Lasvaux, J. Gantner, and M. Bazzana, "Towards a new generation of building LCA tools adapted to the building design process and to the user needs?," in *SB13 Graz*, 2013, pp. 406–417.
- [18] D. Hitchcock, R. Schenk, and T. Gordy, *Directory of Sustainability Life Cycle Assessment Tools*. International Society of Sustainability Professionals, 2011.
- [19] D. Taylor and Construction Management, "BIM vs CAD: What's the Difference?," 2017. [Online]. Available: <https://blog.capterra.com/bim-vs-cad-whats-the-difference/>. [Accessed: 02-Mar-2020].
- [20] R. McPartland, "What is IFC? | NBS," 2017. [Online]. Available: <https://www.thenbs.com/knowledge/what-is-ifc>. [Accessed: 02-Mar-2020].
- [21] A. Haapio and P. Viitaniemi, "A critical review of building environmental assessment tools," *Environ. Impact Assess. Rev.*, vol. 28, no. 7, pp. 469–482, Oct. 2008, doi: 10.1016/J.EIAR.2008.01.002.
- [22] B. Soust-Verdaguer, C. Llatas, and A. García-Martínez, "Critical review of bim-based LCA method to buildings," *Energy Build.*, vol. 136, pp. 110–120, 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.12.009.
- [23] S. Seo, S. Tucker, and P. Newton, "Automated material selection and environmental assessment in the context of 3D building modelling," *J. Green Build.*, vol. 2, no. 2, pp. 51–61, 2007, doi: 10.3992/jgb.2.2.51.
- [24] GHG Protocol, "Calculation Tools." [Online]. Available: [https://ghgprotocol.org/calculation-tools#sector\\_specific\\_tools\\_id](https://ghgprotocol.org/calculation-tools#sector_specific_tools_id). [Accessed: 26-Feb-2020].
- [25] World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), "CO2 Accounting and Reporting Standard for the Cement Industry," 2005.
- [26] Quantis, "Uncertainty Assessment Template for Product GHG Inventories." World Business Council for Sustainable Development, 2011.
- [27] The International Standards Organisation, "ISO 14067:2018 Gases de efecto invernadero - Huella de carbono de productos - Requisitos y directrices para cuantificación." 2018.
- [28] European Standards Organisation, "EN 15978:2012. Sostenibilidad en la construcción. Evaluación del comportamiento ambiental de los edificios. Métodos de cálculo." 2012.
- [29] "ISO 21930:2017(en), Sustainability in buildings and civil engineering works — Core rules for environmental product declarations of construction products and services." [Online]. Available: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:21930:ed-2:v1:en>. [Accessed: 28-Jan-2020].
- [30] "EPD-generator - LCA.no - Skybaserte løsninger for miljødokumentasjon." [Online].

Available: <https://lca.no/en/epd-verktoy/>. [Accessed: 29-Feb-2020].

- [31] Institut Bauen und Umwelt, "Welcome to the EPD online tool of Institut Bauen und Umwelt!" [Online]. Available: <https://epd-online.com/>. [Accessed: 29-Feb-2020].
- [32] "Online and digital tools for the construction industry | BRE Group." [Online]. Available: <https://www.bregroup.com/products/tools/>. [Accessed: 29-Feb-2020].
- [33] "Umweltrechner - betonstein.org." [Online]. Available: <https://www.betonstein.org/service/umweltrechner/>. [Accessed: 29-Feb-2020].
- [34] "Standardised EPDs: calculate yours with SimaPro - SimaPro." [Online]. Available: <https://simapro.com/business/life-cycle-assessments/standardised-epds/>. [Accessed: 29-Feb-2020].
- [35] "LCA and EPD Automation." [Online]. Available: <http://www.gabi-software.com/international/software/lca-and-epd-automation/>. [Accessed: 29-Feb-2020].
- [36] "EPD-Calculator | ERFMI." [Online]. Available: <https://erfmi.com/environment/epd-calculator/#epdcalculator>. [Accessed: 29-Feb-2020].
- [37] "EPD Calculator - TEPPFA." [Online]. Available: <https://www.teppfaepdapp.eu/>. [Accessed: 29-Feb-2020].
- [38] "Climate Earth | EPD Generator." [Online]. Available: <https://www.climateearth.com/instant-on-demand-epds/>. [Accessed: 29-Feb-2020].
- [39] DAPCO, "Declaración Ambiental de Productos Barra de Acero de Refuerzo," 2014.
- [40] The International EPD System, "Declaración Ambiental de Producto Barras de Refuerzo Acero," 2019.
- [41] A. D. Cristea, D. Hummels, L. Puzello, and M. G. Avetisyan, "Trade and the Greenhouse Gas emissions from International Freight Transport," Cambridge, Massachusetts, 2011.
- [42] "A-05 Transport of products to the construction site – complete LCA | EeBGuide." [Online]. Available: <https://www.eebguide.eu/eebblog/?p=1918>. [Accessed: 19-Mar-2020].
- [43] "Kuehne + Nagel: Seafreight Carbon Calculator." [Online]. Available: [https://www.kn-portal.com/seafreight/seafreight\\_overview/environment/seafreight\\_carbon\\_calculator/](https://www.kn-portal.com/seafreight/seafreight_overview/environment/seafreight_carbon_calculator/). [Accessed: 29-Feb-2020].
- [44] "Flexport Help Center Article | Carbon Calculator for Freight Emissions." [Online]. Available: <https://www.flexport.com/help/115-carbon-calculator-freight-emissions/>. [Accessed: 29-Feb-2020].
- [45] "ABACO Chile – abaco." [Online]. Available: <http://abacochile.cl/>. [Accessed: 02-Mar-2020].
- [46] IDIEM and Fundación Chile, "Manual de Uso de la Calculadora ECOBASE," 2014.
- [47] C. Muñoz, M. Vega, A. Rocha, G. Cereceda, A. Molina, and P. González, "Eco-efficiency tool

for the decrease of the environmental load in the life cycle of buildings ÁBACO-Chile," 2020.

- [48] OneClickLCA, "How to choose a Building Life Cycle Assessment tool," *One Click LCA sitio web*, 2020. .
- [49] Athena, "User Manual and Transparency Document: Impact Estimator for Buildings v.5," 2019.
- [50] Bionova LTD, "One Click LCA," 2018. [Online]. Available: <https://www.oneclicklca.com/>.
- [51] ATHENA, "Overview | Life Cycle Assessment Software," 2019. .
- [52] Athena, "Pavement LCA | Athena Sustainable Materials Institute," 2019. .
- [53] "Herramienta CO2." [Online]. Available: <https://co2tool.oerco2.eu/es-ES>. [Accessed: 01-Mar-2020].
- [54] :: "BC3 - ASOCIACIÓN FIEBDC." [Online]. Available: <http://web2.fiebdc.es/bienvenido-a-fiebdc/>. [Accessed: 27-Feb-2020].
- [55] Asociación Ecómetro, "Aspectos metodológicos de la Herramienta de Análisis de Ciclo de Vida de proyectos de edificación."
- [56] "Totem." [Online]. Available: [https://www.totem-building.be/pages/faq.xhtml#film\\_4](https://www.totem-building.be/pages/faq.xhtml#film_4) results. [Accessed: 29-Feb-2020].
- [57] IES, "IES Virtual Environment | Accurate Whole Building Performance Simulation," *IESVE sitio web*, 2020. .
- [58] C. De Wolf, F. Yang, D. Cox, A. Charlson, A. Seif Hattan, and J. Ochsendorf, "Material quantities and embodied carbon dioxide in structures," in *Proceedings of the Intituton of Civil Engineers*, 2015, pp. 1–12, doi: 10.1680/ensu.15.00033.
- [59] KT Innovations, "How can we better understand embodied environmental impacts in order to expand the boundaries of sustainable design?," 2020. [Online]. Available: <https://kierantimberlake.com/pages/view/95/tally/parent:4>. [Accessed: 15-Mar-2020].
- [60] "Totem." [Online]. Available: <https://www.totem-building.be/pages/legal.xhtml>. [Accessed: 29-Feb-2020].
- [61] eTool, "Whole Building Life Cycle Assessment Software - eToolLCD," *eTool sitio web*, 2020. [Online]. Available: <https://etoolglobal.com/about-etoollcd/>.
- [62] IES, "IES Virtual Environment User Guide. Life Cycle Analysis (LCA).," Glasgow, UK, 2015.
- [63] "DGNB at a glance." [Online]. Available: <https://www.dgnb.de/de/aktuell/pressemitteilungen/2011/dgnb-at-a-glance-october>. [Accessed: 01-Mar-2020].
- [64] Tecniberia, "Guía de Usuario HueCO2." 2014.
- [65] A. Freire Guerrero and M. Marrero, "Evaluación a través del presupuesto de la energía

incorporada al proyecto de edificación," *Hábitat Sustentable*, vol. 5, no. 1, pp. 54–63, 2015.

- [66] Ábaco-Chile, "¿Qué información proporciona?" [Online]. Available: <http://abacochile.cl/>. [Accessed: 02-Mar-2020].
- [67] Instituto de la Construcción, *Certificación Edificio Sustentable. Manual Evaluación y Calificación*. Santiago, 2014.
- [68] Instituto Nacional de Normalización, "NCh 1079 of2008. Zonificación Climático Habitacional para Chile y Recomendaciones para el Diseño Arquitectónico," 2010.
- [69] Ministerio de Vivienda y Urbanismo MINVU, "Manual de Procedimientos Calificación Energética de Viviendas en Chile." Ministerio de Vivienda y Urbanismo, p. 254, 2019.
- [70] R. Zheng, J. Jiang, X. Hao, W. Ren, F. Xiong, and Y. Ren, "BcBIM: A Blockchain-Based Big Data Model for BIM Modification Audit and Provenance in Mobile Cloud," *Math. Probl. Eng.*, vol. 2019, 2019, doi: 10.1155/2019/5349538.
- [71] National Institute of Building Sciences (NIBS), "National BIM Guide for Owners." 2017.
- [72] M. Terán *et al.*, "Estudio de costos relacionados con la implementación de metodologías BIM Informe Final," Santiago, Chile, 2019.
- [73] IDIEM, "Estandarización de medidas de partes y piezas de componentes de la construcción-Construye 2025," Santiago, Chile, 2017.
- [74] Construye2025, "¿QUÉ ES CONSTRUYE2025? – Construye2025," *Construye 2025 sitio web*, 2020. [Online]. Available: <http://construye2025.cl/que-es-construye-2025/>.
- [75] PMG, "Proyecto Diagnóstico de Formación de Capital Humano en BIM," 2018.
- [76] Ministerio de Vivienda y Urbanismo MINVU, "Manual de Aplicación de la Certificación Vivienda Sustentable," Santiago, Chile, 2019.
- [77] R. Kitchin, T. P. Lauriault, and G. Mcardle, "Knowing and governing cities through urban indicators, city benchmarking and real-time dashboards," 2017, doi: 10.1080/21681376.2014.983149.
- [78] F. Pomponi and A. Moncaster, "Scrutinising embodied carbon in buildings: The next performance gap made manifest," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, pp. 2431–2442, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.RSER.2017.06.049.
- [79] K. Simonen, C. DeWolf, and B. X. Rodriguez, "Benchmarking the Embodied Carbon of Buildings 1 Introduction," *TAD*, vol. (In print), 2017.
- [80] Y. Chen, S. T. Ng, and M. U. Hossain, "Approach to establish carbon emission benchmarking for construction materials," *Carbon Manag.*, vol. 9, no. 6, pp. 587–604, Nov. 2018, doi: 10.1080/17583004.2018.1522094.
- [81] World Resources Institute, "Estándar de objetivos de mitigación," 2014.

- [82] World Resources Institute, "Estándar de política y acción," 2014.
- [83] World Resources Institute, "Policy and Action Standard Commercial and Residential Buildings Sector Guidance," 2015.
- [84] "Greenhouse Gas Equivalencies Calculator | Energy and the Environment | US EPA." [Online]. Available: <https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gas-equivalencies-calculator>. [Accessed: 29-Feb-2020].
- [85] "Partners - building-transparency.org." [Online]. Available: <https://www.buildingtransparency.org/en/ec3-community/partners/>. [Accessed: 02-Mar-2020].
- [86] "EC3." [Online]. Available: <https://buildingtransparency.org/dashboard/material-search>. [Accessed: 02-Mar-2020].
- [87] "Key Features - building-transparency.org." [Online]. Available: <https://www.buildingtransparency.org/en/resources/ec3-key-features/>. [Accessed: 02-Mar-2020].
- [88] Ministerio del Medio Ambiente, *Decreto: Aprueba Reglamento del Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes RETC*. 2013.
- [89] M. Serrano Ulloa and V. Riveros Pizarro, "Manual para Diseñar e Implementar Registros de Emisiones y Transferencias de Contaminantes - El caso de Chile," 2017.
- [90] A. Ruiz-Sánchez, M. Sánchez-Polo, C. Zaror, and M. Vega, "Greenhouse Gases in the Production of Cement Using Marble Dust as Raw Material," in *2nd International Conference on Construction and Building Research*, 2012.
- [91] J. F. Albornoz Muñoz, "Cálculo de la Huella de Carbono Asociada a la Elaboración de Hormigones Geopoliméricos en Chile," Universidad de Chile, 2015.
- [92] Athena, "Athena Guide to Whole-building LCA in Green Building Programs Contributing Authors," 2014.
- [93] ATHENA, "Impact Estimator Revision History | Life Cycle Assessment Software," 2019. .
- [94] eTool, "Who certifies eTool LCA?," 2015.
- [95] Sustainable Minds, "The Embodied Carbon in Construction Calculator Tool methodology: Not just what, but why? Not just how, but how big can the impact be?," 2019. .
- [96] OneClickLCA, "Life Cycle Assessment software FAQ: One Click LCA explained," *One Click LCA sitio web*, 2020. .
- [97] T. Bruce-Hyrkäs, "7 Steps guide to building life cycle assessment," 2018.
- [98] OVAM, Wallonie Service Public, and Bruxelles Environnement, "FAQ - Utilisation de l'outil TOTEM." TOTEM, p. 38, 2019.

- [99] Centro Tecnológico de la Construcción and IDIEM, "Construcción de indicadores estratégicos y desarrollo de metodología de medición y reporte , para el seguimiento del impacto del programa Construye 2025 en el sector construcción," Santiago de Chile, 2017.

## Anexo A: resúmenes descriptivos de calculadoras de huella de carbono en construcción

### Calculadoras para huella de carbono de otros tipos de obras civiles

**asPECT**: calculadora dedicada a la estimación de la huella de carbono en el ciclo de vida vida del asfalto usado en carreteras. Se encuentra como software (2014) que se puede descargar e instalar de forma gratuita en sistemas Windows. La metodología incluye desde la extracción de las materias primas hasta los escenarios de fin de vida, como el reciclaje del asfalto usado. Asimismo, se considera el movimiento de tierras necesario para la instalación.

La calculadora, manual y guía metodológica se puede descargar desde: <https://trl.co.uk/asphalt-pavement-embodyed-carbon-tool>.

**Athena Pavement LCA** (anteriormente *Impact Estimator for Highways*) es una herramienta de software gratuita basada en ACV para el impacto ambiental de los diseños de infraestructura vial, desarrollada por el Athena Sustainable Materials Institute, la Asociación de Cemento de Canadá. El prototipo y la versión beta se desarrollaron en asociación con Morrison Hershfield, y fue financiado por Environment Canada. Fue usando la misma metodología que el Athena IE para edificación [52]

La *Pavement LCA app* es una aplicación web que proporciona resultados ambientales de ACV y Análisis de Costo del Ciclo de Vida (por sus siglas en inglés LCCA) para las etapas del ciclo de vida de fabricación, construcción y mantenimiento de la infraestructura vial. Permite el diseño de carreteras personalizadas, o los usuarios pueden dibujar de una biblioteca de más de 50 diseños de carreteras canadienses y estadounidenses existentes. Se puede ejecutar desde cualquier navegador web que cumpla con los estándares modernos [52].

### Calculadoras para huella de carbono de edificación

**Athena Impact Estimator for Buildings (IE)**: Programa software gratuito, desarrollado por el Athena Sustainable Materials Institute en colaboración con Morrison Hershfield, fue lanzado por primera vez el año 2002 y ha sido actualizada desde entonces con el apoyo de donantes. La última actualización se realizó en Febrero 2020 bajo el número Athena IE for Buildings 5.4.01 [93]

El Athena IE es un programa software que permite a los usuarios modelar su propio sistema constructivo personalizado y configuraciones de envolvente, y proporciona flexibilidad para los diseños propuestos y los edificios existentes. Los usuarios necesitan conocimientos técnicos, pero no tienen que ser ingenieros estructurales o arquitectos para modelar un edificio [51].

Athena IE es aplicable a nuevas construcciones, renovaciones y extensiones en todos los tipos de edificios de Norteamérica. El software entrega la posibilidad de individualizar a través de datos contexto específicos, tales como matriz energética local, las modalidades y distancias de transporte, y las tecnologías de fabricación de productos según la ubicación del edificio [51].

Puede modelar más de 1,200 combinaciones de ensamblaje estructural y de envolvente de múltiples opciones de diseño permitiendo comparaciones rápidas [51].

El Athena IE proporciona un perfil apoyado por un inventario del ciclo de vida de la cuna a la tumba (módulos A a C) para un edificio completo. Los resultados del inventario comprenden los flujos desde y hacia la naturaleza: flujos de energía y materia prima más emisiones a la atmósfera, el agua y la tierra[51].

Para más información consultar <https://calculatelca.com/software/impact-estimator/>

**Architecture 2020 Carbon Smart Materials Palette:** Desarrollado por Architecture 2030, con el apoyo de miembros de la Embodied Carbon Network (ECN), se define como una "paleta de materiales inteligentes de carbono" que proporciona diseño basado en atributos y directrices de especificación de material para reducciones de carbono global incorporado en el entorno construido.

Características claves: Identifica atributos clave que contribuyen al impacto incorporado de los productos de construcción y ofrece directrices y opciones para la reducción de emisiones de carbono. Este diseñado para apoyar y complementar el análisis de ciclo de vida (ACV) y las declaraciones ambientales de producto (DAP), al proveer directrices para la selección de materiales de bajo carbono y especificaciones. Incluye guías para materiales de alto impacto y de origen natural (Carbon Smart) y reducciones de carbono total en la edificación.

**Database of embodied quantity outputs (deQo):** Calculadora y base de datos online creada por Catherine de Wolf del MIT el 2014.

Esta calculadora utiliza como entrada las cubicaciones de material para cada edificio extraídas del software BIM Revit para los sistemas estructurales del edificio. Estas cubicaciones se obtienen del modelo Revit / Rhinoceros o de la literatura y son actualizadas constantemente a través de una interfaz online [58].

**Ecómetro:** calculadora en línea y gratuita que permite calcular los impactos del ciclo de vida de una edificación a partir de su archivo BC3, un formato estándar de bases de datos de precios y especificaciones para la construcción definido en España y utilizado desde 1996 [54].

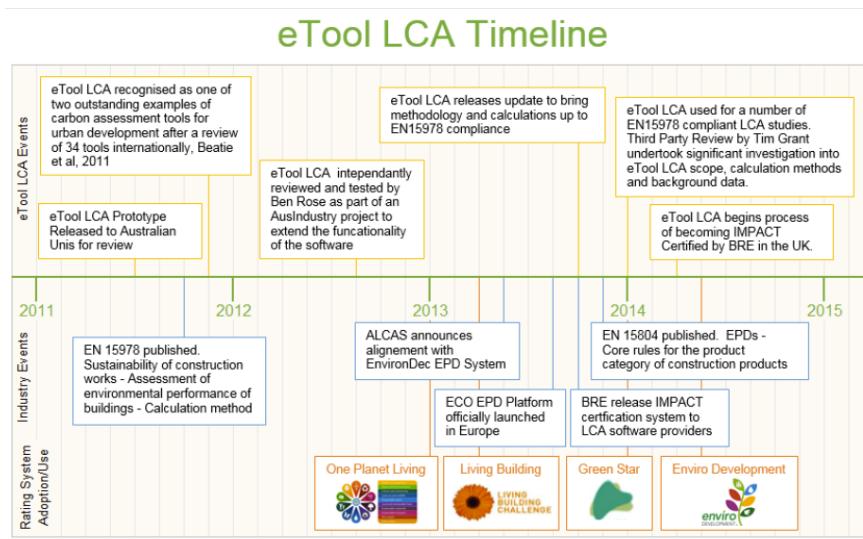
La integración se realiza a través de la carga del archivo y es automática. Sin embargo, el usuario debe complementar información relacionada al transporte de los materiales, su origen (reciclado o no) y su permanencia en la edificación (reposición o no). Asimismo, se debe cargar de forma manual la información sobre consumos operacionales de la edificación [55].

Utiliza las bases de datos genéricas ELCD 3.2 y Ecoinvent 3.1 para evaluar los impactos de ciclo de vida (etapas A1-B6) en siete categorías de impacto, una de las cuales es el Potencial de Calentamiento Global [55].

**eToolLCD:** Calculadora software creada por Alex Bruce y Richard Haynes y comercializada por eTool desde el año 2010. Software intuitivo, de uso abierto, albergado en la web, de evaluación

del ciclo de vida de todo el edificio (ACV). Se caracteriza por su enfoque en el desempeño de la edificación [61]. El software funciona través de una plataforma albergada en la web que permite realizar actualizaciones sin interrupciones en el uso del software[61].

eToolLCD produce informes completos con datos comparables entre edificios con resultados que cumplen con las normas internacionales ISO 14044 y EN 15978. El software eToolLCD es utilizado actualmente en cientos de proyectos en todos los sectores de la industria con más de 3.000 usuarios en todo el mundo [61].



*Figura A.1: Evolución de la calculadora eTool. Los cuadros amarillos indican verificación o certificación por tercera parte independiente. Los cuadros azules resumen los estándares clave o las acciones del cuerpo de la industria. Las cajas naranjas resumen la adopción o el uso por los principales sistemas de calificación. [94]*

**EC3:** Herramienta\_gratuita de acceso abierto creada y desarrollada el año 2019 por el Skanska, Carbon Leadership Forum, y Carbon solutions con aportes de una coalición de casi 50 organizaciones. La herramienta EC3 se enfoca en el acceso y visualización de los datos de emisiones de carbono de los materiales de la construcción, con el objetivo permitir a la industria la toma de decisiones al crear edificios de referencia durante el diseño, la especificación y la licitación. La herramienta EC3 establece un "presupuesto de carbono" durante el diseño que luego pueda ser administrado a través de un "control de cantidad" de productos y esfuerzos de adquisición, que luego se validan durante el proceso de construcción [16].

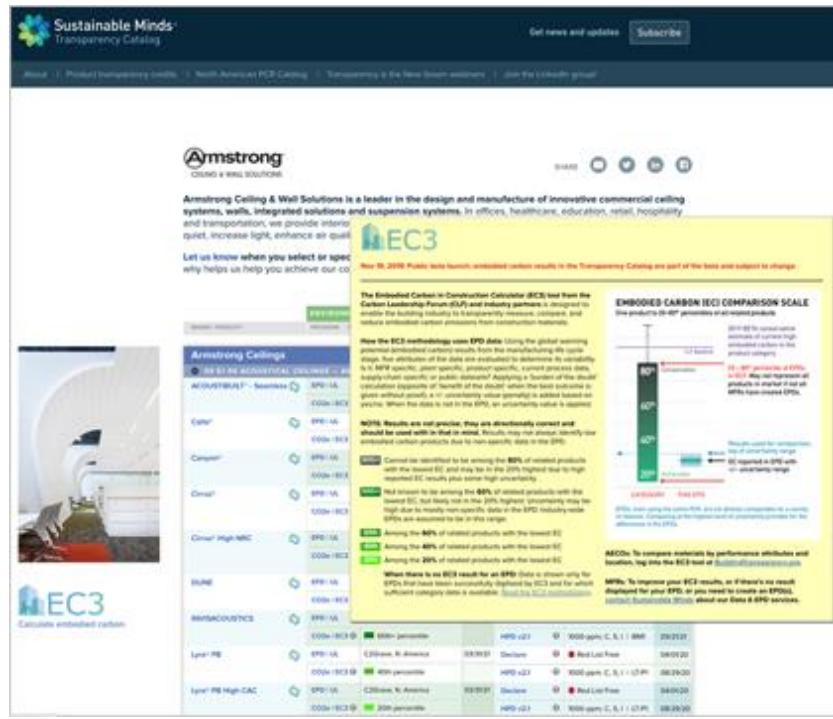


Figura A.2. Los datos de la calculadora EC3 se pueden consultar a través del "catalogo de la transparencia" de Sustainable Minds [95].

**IESVE:** IES Virtual Environment (IESVE) es un paquete de software creado en Glasgow, UK en 1995 que traduce la complejidad del proyecto y los cálculos térmicos dinámicos detallados en información técnica y visualizaciones fáciles de entender. Es una herramienta de construcción digital utilizado globalmente con más de 75,000 proyectos IESVE en promedio por año [57]

El módulo de ACV dentro del entorno virtual IES, permite a los usuarios evaluar el impacto ambiental de las edificaciones como una de los diversos análisis del paquete de software [57].

El módulo de ACV IES contiene una base de datos integrada de datos detallados de impactos ambientales de sistemas constructivos y materiales proporcionados por la base de datos IMPACT<sup>12</sup> de BRE. Los impactos del proyecto se utilizan para proporcionar resultados detallados. Los datos de salidas permiten al usuario hacer decisiones clave de material o construcción y estrategias de compensación desde el diseño conceptual hasta etapas de diseño detallado [62].

<sup>12</sup> BRE Centre for Sustainable Products desarrolla la base de datos IMPACT (IMPACT DB) para productos de construcción. La última versión 5, lanzada en marzo de 2018 contiene aproximadamente 350 conjuntos de datos que cumplen con la norma EN 15804 y que han sido modelados en SimaPro, utilizando la RCP BRE Global EN 15804, Ecoinvent v3.2 y varios datos primarios de la Asociación de Comercio / fabricantes representativos donde corresponda.

## Footprint Calculator



Figura A.3. Reporte de Salida del software footprint calculator.

**OERCO2:** calculadora online, abierta y gratuita desarrollada como herramienta de apoyo a la enseñanza de adultos sobre el efecto de las decisiones de diseño en los impactos de ciclo de vida de una construcción, para edificaciones en Italia, España, Portugal y Rumanía. Para hacerlo se basa en las características de la obra, como número de pisos, superficie, materiales, técnicas de construcción y equipamiento. En pocos minutos se obtiene una evaluación de la huella de carbono de la obra por:

- Materiales y maquinaria;
- Familia de materiales; y
- Partidas.

Los campos incluidos en la calculadora se basan en varios estudios sobre la materialidad y técnicas de construcción más comunes en los países considerados en el proyecto.

**One Click LCA:** herramienta basada en web de ACV, costo de ciclo de vida (LCC), y circularidad desarrollado por Bionova Ltd, Finlandia.

One Click LCA permite cálculos de todas las etapas del ciclo de vida en el marco de cuna -a -la tumba, conforme a norma EN 15978, incluidos los productos y procesos de construcción en las

etapas A1-A5, uso de edificios, mantenimiento, consumo de energía y agua en B1-B7, impactos al final de la vida útil en C1-C4 e impactos externos en el módulo D [96].

	A1-A3	A4	A5	B1-B3	B4-B5	B6	B7	C1	C2	C3-C4	D
Complete building LCA (EN 15978)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
BREEAM -UK / -Intl	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Building element LCA / BREEAM SE / NOR 1.0/11	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
LEED (CML, TRACI and Intl)	x	x		x	x			x	x	x	
HQE	x			x	x	x		x	x	x	x
DGNB-DE / -Intl / -DK	x				x	x				x	x
Bâtiment Bas Carbone	x	x	x	x	x					x	
Life cycle CO2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
IMPACT-equivalent	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
IMPACT-compliant	x		x		x			x	x	x	
Embodied impacts of materials	x										

Figura A.4. Etapas del ciclo de vida cubiertas por el software One Click LCA dependiendo del sistema de certificación al que se requiera reportar [96].

One Click permite importar datos desde archivos Excel, Revit, BIM, IESVE y diversas otras herramientas [96]. Al importar un archivo BIM / Revit / gbXML o Excel, el software asigna automáticamente los datos a una extensa base de datos y automatiza los cálculos, entregando un informe detallado que luego puede enviar para fines de certificación o para informar decisiones de diseño [97].



Figura A.5. Integración OneClickLCA con otras herramientas.

**Tally:** Plug in de REVIT creado por KT Innovations, en asociación con Autodesk and thinkstep. Actualmente en versión 2020.01.15.01, requiere Autodesk Revit 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, or 2020.

**TOTEM:** calculadora online gratuita que busca evaluar los impactos ambientales de edificios en todo su ciclo de vida y optimizar las decisiones de diseño para reducir el impacto ambiental de nuevas construcciones y renovaciones [98]. Para ello la calculadora trabaja con los materiales de la edificación, el transporte hasta el sitio, movimientos de tierra, procesos, reparaciones y la energía operacional y entrega resultados de impacto sobre todo el ciclo de vida (etapas A1-C4) [98]. La inclusión de la etapa D está en desarrollo.

El ingreso de los datos se puede realizar manual o automáticamente con un diseño IFC proveniente de Revit o ArchiCAD (la integración con BIM se está desarrollando) [56].

Esta herramienta incluye funciones de visualización geométrica, para ver exactamente cuál muro de la edificación se está trabajando o incluso para diseñar sistemas constructivos propios del proyecto, como se ve en la Figura A.6 [56].

La base de datos incluye información de materiales y algunos sistemas constructivos. La calculadora permite montar conjuntos de datos para sistemas constructivos que no estén incorporados aún en el sistema, con los materiales que los componen, como placas de MDF, espacios de aire, aislantes, entre otros.

En la figura se ve la especificación de un muro externo. El analista puede definir cada capa del muro por material. Estos materiales se asocian a conjuntos de datos en Ecoinvent 3.3, desde donde se extraen sus emisiones en el ciclo de vida. Se encuentra en desarrollo la utilización de declaraciones ambientales de producto (DAP) locales [56].

El software también calcula automáticamente la transmitancia térmica del muro y otros componentes usando el diseño geométrico y la caracterización de las capas. Con esa información se estima la energía operacional en la vida útil de la edificación [56].

La calculadora entrega el impacto sobre todo el ciclo de vida de la edificación en 17 categorías de impacto, incluyendo potencial de calentamiento global (huella de carbono). Además, entrega un resultado único (single score) en unidades monetarias, que se logra monetizando los resultados de las categorías de impacto. Estos resultados monetizados se presentan por etapa del ciclo de vida [56].

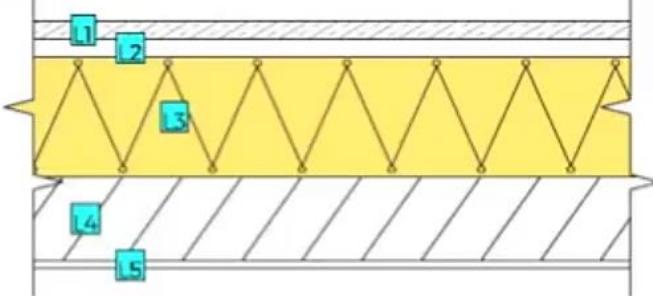
Por el momento la calculadora no considera la reutilización de materiales en otros proyectos, por lo que asocia todo el impacto ambiental de los materiales al proyecto en análisis [56].

A diferencia de otras calculadoras de edificaciones, esta es una iniciativa conjunta de tres instituciones públicas de Bélgica: la Agencia Pública de los Residuos de Flanders (OVAM), el Servicio Público de Wallonia (SPW) y la Agencia Ambiental de Bruselas (Brussels Environment) [60].

Edit Element Type External wall cotage (Copy) X

## External wall cotage (Copy)

Name: External wall cotage (Copy)  
 Description:  
 Category: Wall-External Wall  
 Reference: (21)+  
 Environmental cost: ? U-value:



**ADD LAYER**

Layer	Materials	New / Existing	m	W/m.K
			Thickness	Lambda
EXT L1	+ Wall finish, external - closing sub-element - ceramic roofing tile (472x303x31)	New	0.031	1.345 193 229
EXT L2	+ Air cavity - 3 cm, horizontal - not ventilated	New	0.03	
INT L3	+ Thermal insulation, cavity wall - blanket - stone wool - medium hard (40 kg/m³)	New	0.25	0.036 <sup>r,f</sup> ①
INT L4	+ Outer wall - load-bearing - primary part - blocks/bricks - concrete - dense (290x140x190) incl. mortar (1 cm joint)	New	0.14	1.664 <sup>r,f</sup> ①
INT L5	+ Wall finish, internal - plaster - gypsum plaster on brickwork - by machine (for paint or wall paper)	New	0.01	0.4
<b>Totals</b>			<b>0.411</b>	

Created 15.2.2018 13:24:41 by Peter Van Daele

**CANCEL** **APPLY** **SAVE**

Figura A.6. Captura de pantalla TOTEM.

## Calculadoras para huella de carbono de productos

**GCCA tool:** Calculadora para crear DAP de productos de cemento y hormigón creada por el Global Cement and Concrete Association (GCCA). Actualmente en la versión 2.0 lanzada en Octubre del 2019, la GCCA desarrolló esta herramienta para fortalecer los esfuerzos de desarrollo de DAP en el mundo.

La herramienta DAP de GCCA ha sido desarrollada por Quantis, verificada por Studio Fieschi, y es la primera herramienta de la industria en el International EPD System. Se basa en estándares y reglas de categoría de producto reconocidos internacionalmente.

Además de ayudar a cuantificar el impacto ambiental de los productos existentes, la herramienta DAP para la industria también se puede usar durante el desarrollo del producto, lo que permite comparaciones rápidas y fáciles entre las opciones de diferentes componentes y mezclas para determinar cómo reducir los impactos ambientales, al tiempo que ofrece el rendimiento requerido.

**ECOBASE Construcción:** Calculadora en Excel enmarcada dentro de los proyectos Ecobase Alimentos y Ecobase Construcción, los cuales tuvieron como objetivo entregar información de impacto ambiental de los productos abarcados por ambos proyectos a usuarios no expertos en Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Esta calculadora está descontinuada.

Los resultados de la calculadora tienen por finalidad proporcionar información acerca de la línea base de los impactos ambientales de los productos dentro del proyecto, para poder tomar decisiones más informadas y realizar gestión interna. Los resultados de la calculadora no pueden ser usados para realizar fines comunicacionales a terceros ni con fines publicitarios [46].