

## HERRAMIENTA INTEGRADA DE EVALUACIÓN LCA Y S-LCA PARA EDIFICIOS BASADA EN GEMELOS DIGITALES

Concepción Toribio Díaz<sup>1</sup>, Paula López Arévalo<sup>2</sup>, Ana Rubio Bustos<sup>3</sup>, Israel Hernández González<sup>4</sup>

<sup>1</sup> CEMOSA, Málaga, España, concepcion.toribio@cemosa.es

<sup>2</sup> CEMOSA, Málaga, España, paula.lopez@cemosa.es

<sup>3</sup> CEMOSA, Málaga, España, ana.rubio@cemosa.es

<sup>4</sup> CEMOSA, Málaga, España, israel.hernandez@cemosa.es

### Resumen

Este trabajo presenta una herramienta integrada de evaluación ambiental y social del ciclo de vida de edificios, basada en metodologías LCA (Life Cycle Assessment) y S-LCA (Social Life Cycle Assessment), orientada al apoyo a la toma de decisiones en materia de sostenibilidad a lo largo del ciclo de vida del activo. La propuesta combina la evaluación ambiental y social en un entorno digital unificado, permitiendo un análisis integral de los impactos asociados tanto a la fase de construcción como a la fase de operación del edificio.

La metodología integra análisis de ciclo de vida ambiental apoyado en modelos BIM para la fase constructiva, junto con la monitorización del desempeño operacional mediante datos reales obtenidos durante la etapa de servicio. Paralelamente, se implementa un marco estructurado de indicadores sociales que evalúa aspectos como accesibilidad, adaptabilidad, impacto urbano, resiliencia climática y seguridad. La arquitectura digital desarrollada permite automatizar el cálculo de indicadores clave (KPIs) y visualizar los resultados de forma interactiva, facilitando su interpretación y gestión.

La herramienta ha sido aplicada a un edificio real e integrada en CEMBOX, plataforma basada en Gemelo Digital, demostrando su potencial para mejorar la gestión sostenible del activo, incrementar el conocimiento sobre sus impactos ambientales y sociales y favorecer su integración en el entorno urbano. Los resultados ponen de manifiesto las ventajas de combinar BIM, Gemelos Digitales y metodologías de evaluación del ciclo de vida para avanzar hacia entornos construidos más sostenibles y resilientes.

**Palabras Clave:** LCA, S-LCA, Gemelo Digital, Sostenibilidad.

### 1 Introducción

La evaluación de la sostenibilidad en la edificación ha evolucionado significativamente en las últimas décadas, pasando de enfoques centrados exclusivamente en el desempeño energético hacia modelos integrales que consideran simultáneamente los impactos ambientales, sociales y económicos a lo largo de todo el ciclo de vida. En este contexto, el Análisis de Ciclo de Vida (LCA, por sus siglas en inglés) se ha consolidado como una herramienta ampliamente utilizada para cuantificar impactos ambientales asociados a materiales, procesos constructivos y operación del edificio. Sin embargo, este enfoque presenta limitaciones al no capturar de forma completa las dimensiones sociales y la interacción del edificio con su entorno urbano.

Para superar estas limitaciones, ha cobrado relevancia el Análisis de Ciclo de Vida Social (S-LCA), que incorpora aspectos relacionados con la calidad de vida de los usuarios, el impacto en la comunidad, la accesibilidad o la seguridad. La integración de ambos enfoques, LCA y S-LCA, permite avanzar hacia una evaluación holística del desempeño de los edificios, especialmente relevante en contextos urbanos complejos como las supermanzanas.

En paralelo, el desarrollo de tecnologías digitales ha abierto nuevas oportunidades para la gestión y análisis de información en el sector de la construcción. En particular, los Gemelos Digitales (Digital Twins) permiten integrar datos procedentes de modelos BIM, sistemas de monitorización en tiempo real y herramientas de análisis y simulación, facilitando la evaluación dinámica del comportamiento del edificio y la exploración de escenarios de mejora.

En este contexto, el presente trabajo propone una herramienta integrada de evaluación ambiental y social basada en la combinación de LCA y S-LCA, implementada en un entorno de gemelo digital. Esta herramienta permite evaluar de forma conjunta los impactos ambientales y sociales de los edificios a lo largo de su ciclo de vida, incorporando tanto la fase de construcción como la fase de operación.

La herramienta se ha desarrollado en el contexto del proyecto SUSTAIN, *Supermanzanas Urbanas Sostenibles mediante Tecnologías de Gemelo Digital y Análisis Inteligente del Impacto Social y Ambiental*), financiado por el Centro para el Desarrollo Tecnológico y la Innovación (CDTI). En particular, la metodología se basa en la integración de:

- Inventarios LCA derivados de modelos BIM para la fase de construcción
- Datos reales de monitorización de consumo energético para la fase de operación
- Indicadores sociales estructurados que evalúan la interacción edificio-usuario-entorno.

Esta integración se materializa en una arquitectura digital que permite la automatización de cálculos, la actualización dinámica de resultados y la visualización interactiva de indicadores, facilitando así su aplicación en contextos reales de gestión y planificación urbana.

El objetivo principal del trabajo es, por tanto, desarrollar y validar una metodología integrada, reproducible y escalable que permita evaluar de forma conjunta los impactos ambientales y sociales de los edificios, apoyando la toma de decisiones en diseño, operación y gestión urbana.

## **2 Metodología integrada LCA-S-LCA**

### **2.1 Enfoque general e integración ambiental-social**

La metodología propuesta se fundamenta en la integración de los enfoques de Análisis de Ciclo de Vida (LCA) y Análisis de Ciclo de Vida Social (S-LCA), con el objetivo de proporcionar una evaluación holística del desempeño de los edificios. Este enfoque amplía los límites tradicionales del análisis ambiental para incluir no solo los impactos asociados a materiales, energía y emisiones, sino también las dimensiones sociales derivadas del uso del edificio y su interacción con el entorno urbano.

Desde el punto de vista conceptual, la metodología se alinea con los principios establecidos en los estándares internacionales de LCA y en los marcos europeos de evaluación de la sostenibilidad en edificación, garantizando la coherencia y comparabilidad de los resultados

[1,2,3,4]. No obstante, introduce una serie de elementos diferenciadores que responden a las limitaciones de los enfoques convencionales.

En primer lugar, se plantea una integración explícita de las dimensiones ambiental y social, lo que permite evaluar de manera conjunta los impactos del edificio en términos de consumo de recursos, emisiones y bienestar de los usuarios. Este enfoque evita la fragmentación habitual entre diferentes metodologías de análisis y facilita la identificación de sinergias y posibles conflictos entre objetivos de sostenibilidad.

En segundo lugar, la metodología incorpora un enfoque dinámico en la fase de operación, basado en datos reales de monitorización, lo que permite evaluar el comportamiento del edificio en condiciones reales de uso. Esto supone una mejora significativa frente a los modelos estáticos tradicionales, que se basan en hipótesis de consumo y pueden introducir incertidumbres relevantes.

Por último, la metodología se implementa en un entorno de gemelo digital, que actúa como sistema integrador de datos, herramientas de cálculo y capacidades de visualización. Este enfoque permite transformar la evaluación del ciclo de vida en un proceso continuo, en el que los resultados pueden actualizarse y analizarse a lo largo del tiempo.

## 2.2 Rol del gemelo digital y del modelo BIM

El gemelo digital constituye el elemento central de la metodología, proporcionando la infraestructura necesaria para integrar y gestionar la información procedente de las distintas fuentes de datos. Su función principal es consolidar en un entorno único los diferentes componentes del análisis, incluyendo modelos BIM, inventarios LCA, datos de monitorización y resultados de la evaluación social.

En este contexto, el gemelo digital permite no solo almacenar información, sino también procesarla y transformarla en indicadores útiles para la toma de decisiones. La automatización de los cálculos de impacto ambiental y social reduce la intervención manual y mejora la eficiencia del proceso, mientras que la actualización continua de los datos permite reflejar la evolución del edificio a lo largo de su ciclo de vida.

Por su parte, el modelo BIM del activo construido desempeña un papel clave como fuente de información para el análisis de la fase de construcción. A partir de este modelo digital, es posible obtener datos relativos a los materiales, sistemas constructivos y procesos ejecutados durante la obra, facilitando la evaluación del impacto asociado al ciclo de vida de la infraestructura. Esta integración permite comparar el comportamiento entre distintas fases —como construcción y servicio—, extraer conclusiones para futuras actuaciones y mejorar la trazabilidad y el aprovechamiento de la información en procesos de planificación y gestión.

Asimismo, la integración de datos dinámicos procedentes de sistemas de monitorización (consumos energéticos, producción renovable, condiciones ambientales, entre otros) permite enriquecer el modelo digital y mejorar la precisión de la evaluación en fase de uso. De este modo, el gemelo digital se configura como un entorno evolutivo que integra información estática y dinámica, habilitando un análisis más completo y realista del desempeño del edificio. La Figura 1 a continuación muestra un esquema de la metodología integrada S-LCA desarrollada.

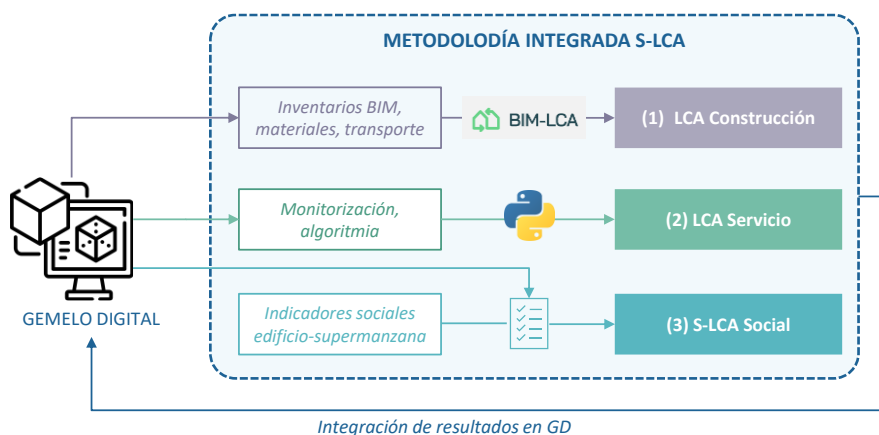


Figura 1. Esquema de la metodología S-LCA

En conjunto, la combinación de LCA, S-LCA, BIM y gemelo digital constituye la base de una metodología integrada que no solo permite evaluar los impactos del edificio, sino también apoyar la toma de decisiones orientadas a mejorar su sostenibilidad a lo largo del tiempo.

### 3 Metodología de evaluación

#### 3.1 Evaluación ambiental (LCA)

La evaluación ambiental se basa en la aplicación del enfoque de Análisis de Ciclo de Vida (LCA) para cuantificar los impactos asociados al edificio a lo largo de distintas etapas de su ciclo de vida. La metodología adopta una aproximación diferenciada para las fases de construcción y operación, permitiendo capturar tanto los impactos embebidos en los materiales como aquellos derivados del uso del edificio.

En la fase de construcción, el análisis se fundamenta en la generación automatizada del inventario del ciclo de vida a partir del modelo BIM. Esta aproximación permite superar las limitaciones de los métodos tradicionales basados en inventarios manuales, reduciendo la incertidumbre y mejorando la trazabilidad de los datos. En particular, el modelo BIM, en formato IFC, se procesa mediante herramientas de análisis específicas que permiten identificar los elementos constructivos, extraer las cantidades de materiales y generar un inventario estructurado de forma automática. Este enfoque se alinea con estrategias de integración BIM-LCA de tipo híbrido [5], combinando la extracción directa de datos con su posterior procesamiento en herramientas de evaluación ambiental.

El inventario obtenido se vincula posteriormente con bases de datos LCA que permiten calcular los impactos asociados a las distintas fases del ciclo productivo de los materiales, incluyendo extracción, fabricación, transporte e instalación. De este modo, se obtienen indicadores ambientales representativos del impacto del edificio en fase de construcción, considerando categorías habituales como el potencial de calentamiento global o el consumo de recursos.

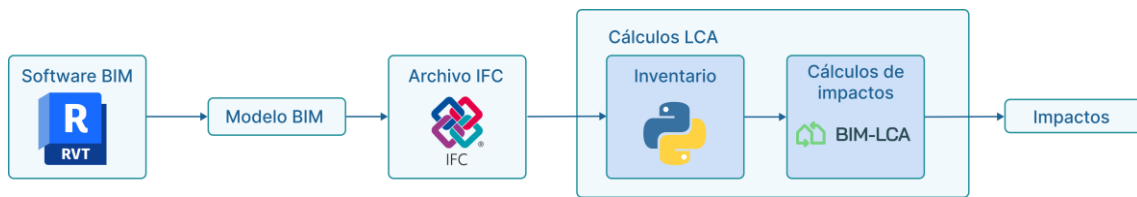


Figura 2. Diagrama de flujo de trabajo utilizado en el LCA fase construcción

En la fase de operación, la metodología introduce un enfoque innovador basado en el uso de datos reales de monitorización. A diferencia de los métodos tradicionales, que utilizan estimaciones estáticas de consumo energético, el presente enfoque permite incorporar información dinámica procedente de sensores y sistemas de seguimiento del edificio. Esto posibilita realizar un cálculo continuo de los impactos ambientales, adaptado a los patrones reales de uso y a las condiciones de operación.

El cálculo en esta fase combina la estimación inicial del consumo energético del edificio con la incorporación progresiva de datos reales de monitorización, permitiendo actualizar los resultados a lo largo del tiempo. Asimismo, se consideran tanto los consumos energéticos procedentes de la red como la estimación de la producción local de energía renovable mediante placas fotovoltaicas, cuando está disponible. Este enfoque dinámico permite optimizar el rendimiento energético y evaluar el impacto de diferentes estrategias de operación. La Figura 3 muestra un ejemplo de la monitorización continua de la energía medida en la red, la energía estimada fotovoltaica y la suma de ambas.

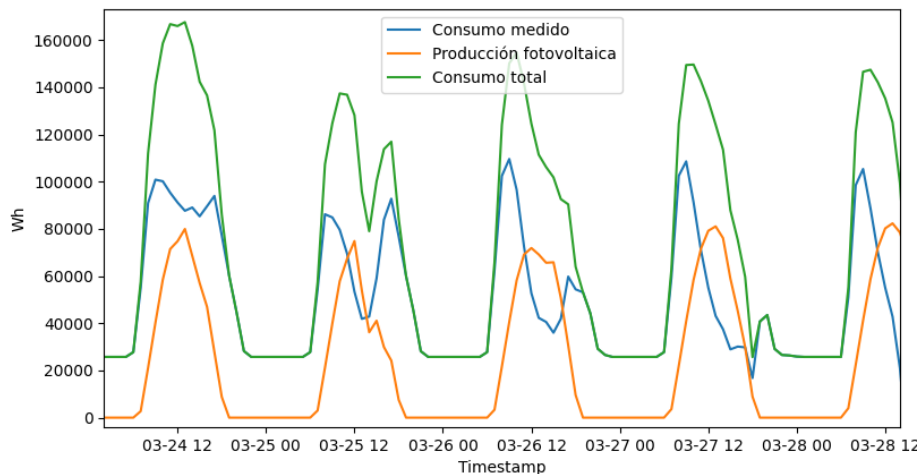


Figura 3. Evolución de consumo de energía medida, fotovoltaica y total.

En conjunto, la metodología LCA adoptada permite evolucionar desde un análisis estático hacia un modelo dinámico y actualizado, reforzando su utilidad como herramienta de apoyo a la toma de decisiones en todas las fases del ciclo de vida del edificio.

### 3.1 Evaluación social (S-LCA)

La evaluación social se desarrolla mediante la aplicación del enfoque de Ciclo de Vida Social o Social Life Cycle Assessment (S-LCA), adaptado específicamente al contexto de la edificación y

a su interacción con el entorno urbano. Esta aproximación permite incorporar de manera estructurada las dimensiones sociales en el análisis del ciclo de vida, complementando la evaluación ambiental.

La metodología se basa en la definición de un conjunto de indicadores sociales organizados en categorías que reflejan los principales ámbitos de impacto del edificio sobre los usuarios y el entorno. Entre estas categorías se incluyen aspectos relacionados con la accesibilidad al edificio, la adaptabilidad a diferentes necesidades de uso, el impacto sobre el vecindario, la resiliencia frente a condiciones climáticas y la seguridad.

Cada categoría se descompone en subcategorías e indicadores específicos que permiten evaluar de forma detallada distintos aspectos del desempeño social. Estos indicadores pueden ser tanto cuantitativos como cualitativos, dependiendo de la disponibilidad de datos y de la naturaleza del aspecto evaluado. La recogida de información se realiza mediante diversas fuentes, incluyendo datos del gemelo digital, mediciones específicas y, en algunos casos, encuestas o evaluaciones de usuarios. La Figura 4 muestra el esquema de categorías y subcategorías que se analizan en la metodología.

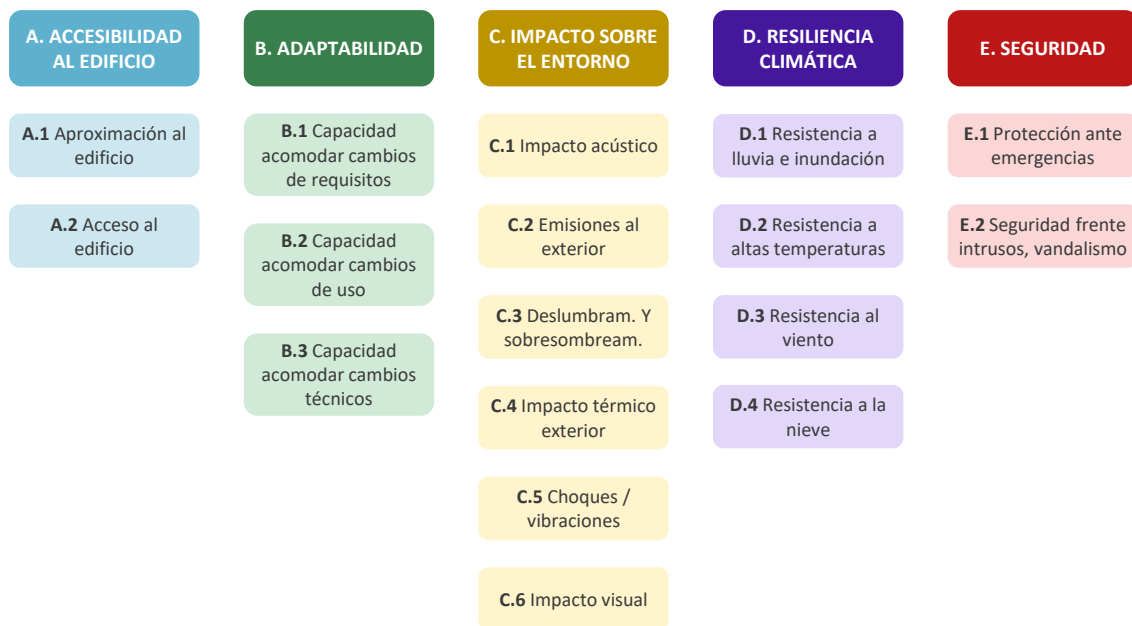


Figura 4. Esquema de categorías y subcategorías de indicadores sociales

Para garantizar la comparabilidad de los resultados, la metodología establece un sistema de puntuación que permite normalizar los valores de los indicadores y agregarlos en resultados sintéticos por categoría. Este enfoque facilita la interpretación de los resultados y permite identificar áreas de mejora en relación con el desempeño social del edificio.

Un aspecto relevante de la metodología es su capacidad de integración con el entorno digital, lo que permite actualizar los indicadores sociales en función de la información disponible y de la evolución del edificio. Aunque la dimensión social presenta una mayor complejidad en términos de cuantificación, su incorporación en el análisis permite obtener una visión más completa del impacto del edificio, considerando no solo aspectos técnicos y ambientales, sino también el bienestar de los usuarios y su relación con el entorno urbano.

En consecuencia, el enfoque S-LCA adoptado proporciona un marco estructurado y flexible para la evaluación de los impactos sociales en edificación, facilitando su integración con otras dimensiones de sostenibilidad dentro de la metodología global.

#### **4 Implementación en el Gemelo Digital**

La metodología integrada LCA-S-LCA se implementa en un entorno de gemelo digital desarrollado sobre la plataforma *cemBOX*, que actúa como sistema integrador para la evaluación continua del desempeño ambiental y social del edificio. Este entorno permite consolidar en un único marco operativo las distintas componentes de la metodología, facilitando su aplicación en contextos reales.

El enfoque de implementación se basa en la integración de tres tipos de datos complementarios:

- i. Información estática procedente del modelo BIM,
- ii. Datos dinámicos derivados de sistemas de monitorización y
- iii. Resultados asociados a la evaluación de indicadores sociales.

La combinación de estas fuentes permite construir una representación digital del edificio que refleja tanto su configuración física como su comportamiento en uso y su interacción con el entorno.

Desde el punto de vista funcional, el gemelo digital permite la automatización de los procesos de cálculo, integrando los distintos módulos de análisis (LCA en fase de construcción, LCA en operación y S-LCA) en un flujo de trabajo común. Este enfoque reduce la fragmentación de herramientas y mejora la coherencia de los resultados, al asegurar que todos los análisis se basan en un mismo conjunto de datos actualizado.

Otro aspecto relevante es la capacidad del sistema para visualizar de forma integrada los resultados, combinando representaciones gráficas de indicadores con su localización en el modelo del edificio. Esta integración facilita la interpretación de los resultados y permite identificar de manera intuitiva los elementos o sistemas con mayor impacto.

En conjunto, la implementación en el gemelo digital permite trasladar la metodología LCA-S-LCA a un entorno operativo, reforzando su aplicabilidad práctica y su potencial como herramienta de apoyo a la toma de decisiones, a la planificación y gestión de edificios en contextos urbanos complejos.

#### **5 Aplicación a caso de estudios y resultados**

La metodología desarrollada ha sido validada mediante su aplicación a un edificio de oficinas real, utilizado como caso piloto dentro del proyecto. Este edificio, actualmente en operación, permite disponer tanto de información detallada del modelo constructivo como de datos reales de uso y monitorización, lo que lo convierte en un entorno adecuado para evaluar de forma integrada los impactos ambientales y sociales.

La implementación de la metodología en este caso de estudio ha permitido demostrar su viabilidad operativa y su capacidad para generar información relevante para la toma de decisiones. En particular, el análisis se ha estructurado en tres dimensiones complementarias: evaluación

ambiental en fase de construcción, evaluación ambiental en fase de operación y evaluación social basada en indicadores.

Desde el punto de vista ambiental, la aplicación en fase de construcción ha permitido generar de forma automatizada un inventario detallado de materiales a partir del modelo BIM, facilitando la identificación de los principales elementos contribuyentes al impacto. Este tipo de análisis permite detectar los denominados *hotspots* del edificio, es decir, aquellos sistemas constructivos con mayor peso en los impactos globales, lo que resulta clave para plantear estrategias de mejora en fases de diseño o rehabilitación. La Figura 5 muestra los resultados de impactos ambientales de los distintos indicadores en etapa de construcción categorizados por elemento constructivo. Los impactos ambientales medidos en etapa de construcción son: ADPF (Potencial de agotamiento abiótico de los recursos fósiles), ADPE (Potencial de agotamiento abiótico de los recursos fósiles), AP (Potencial de agotamiento abiótico de los recursos fósiles), GWP (Huella de carbono), EP (Huella de carbono), POCP (Potencial de creación de ozono fotoquímico), ODP (Potencial de agotamiento del ozono), PERT (Consumo de energía renovable) y PENRT (consumo de energía no renovable).

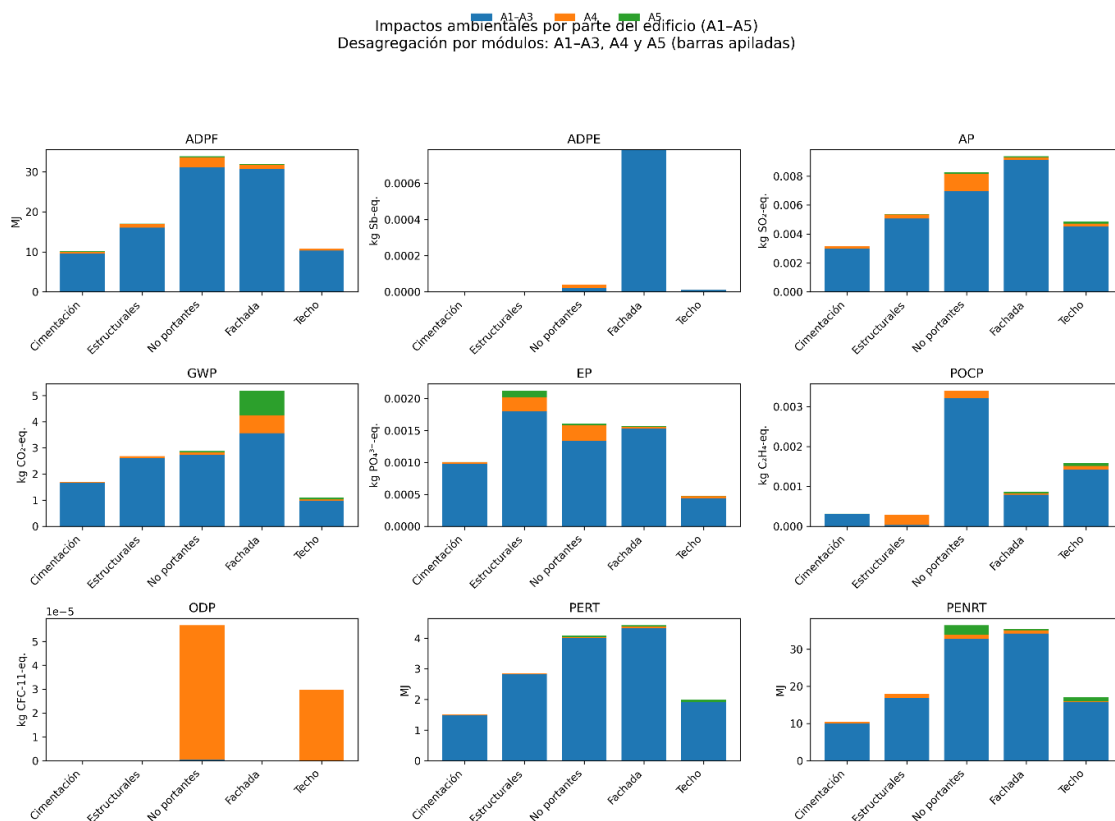


Figura 5. Impactos ambientales desagregados por elemento constructivo.

En la fase de operación, la incorporación de datos reales de consumo ha permitido evaluar de forma dinámica el comportamiento del edificio a lo largo del tiempo. La actualización periódica de los indicadores ambientales ha evidenciado la influencia directa de los patrones de uso y de la gestión energética en los resultados obtenidos, poniendo de manifiesto la relevancia de esta fase dentro del ciclo de vida global del edificio.

En paralelo, la evaluación social ha permitido caracterizar el desempeño del edificio en relación con aspectos como la accesibilidad, la adaptabilidad, el impacto sobre el entorno urbano, la resiliencia climática o la seguridad. La aplicación del sistema de indicadores ha facilitado la identificación de fortalezas y áreas de mejora, proporcionando una visión estructurada del impacto social del edificio y su interacción con el entorno. La Figura 6 muestra el gráfico de araña con los resultados de la evaluación social para los cinco indicadores. Este gráfico y los correspondientes a las subcategorías de cada indicador han sido integrados en el gemelo digital.

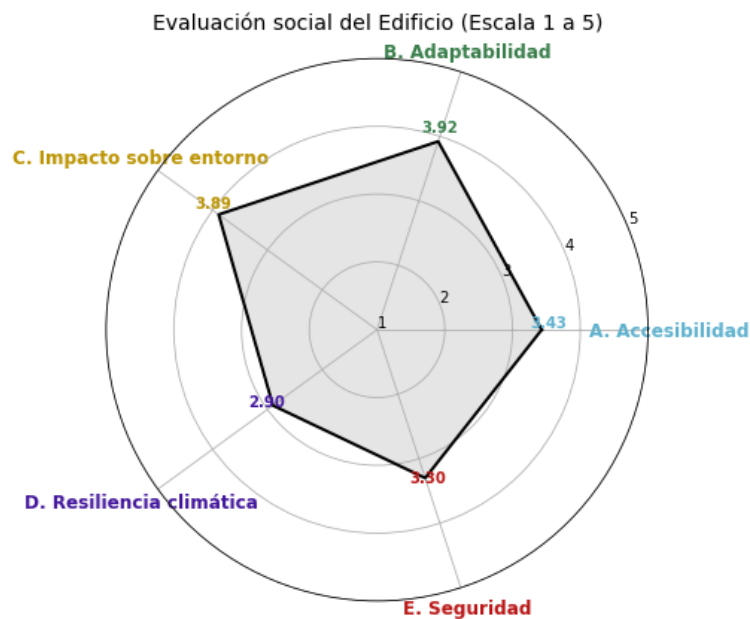
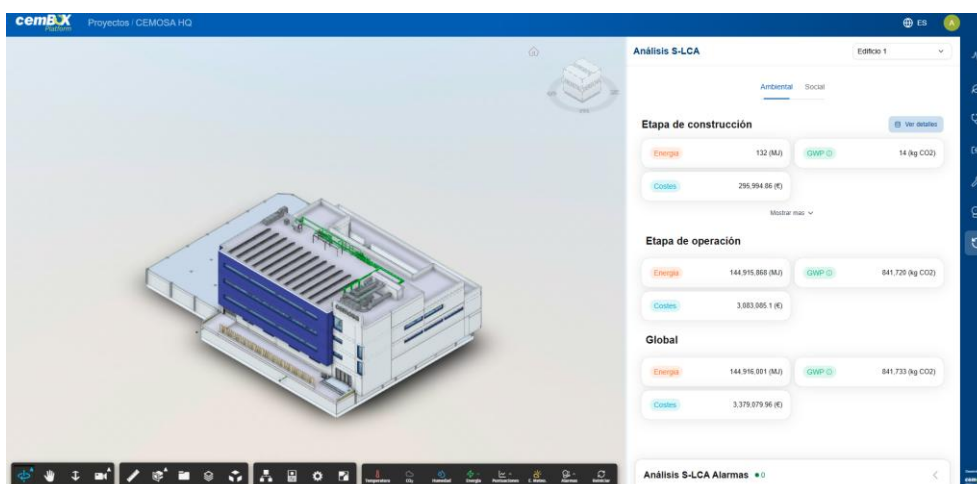
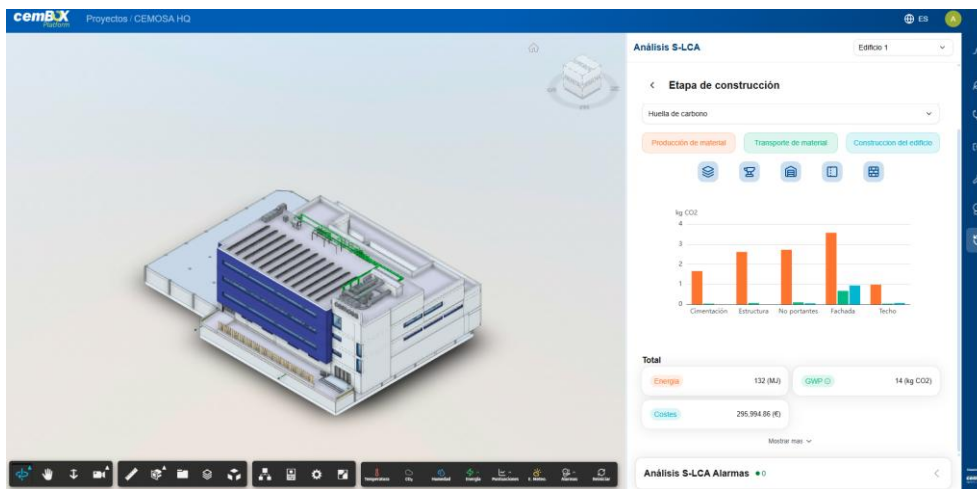


Figura 6. Resultados de la evaluación de indicadores sociales

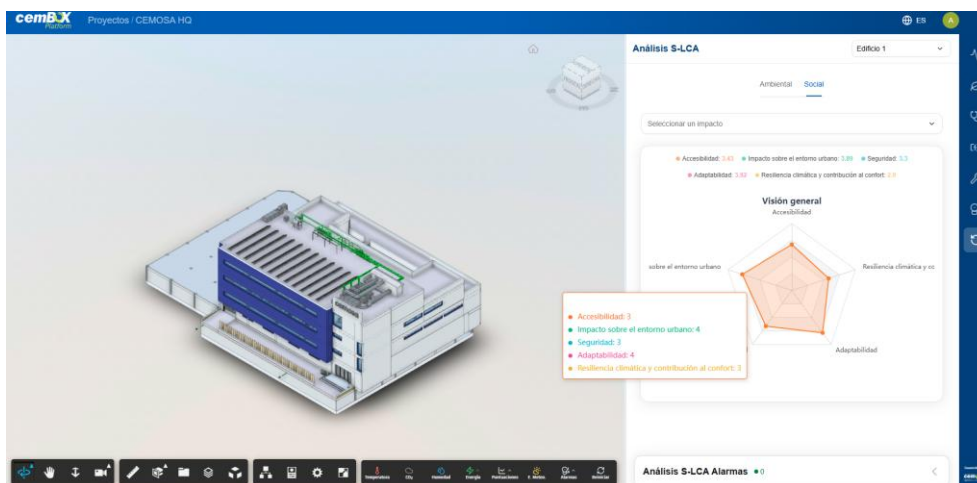
La integración de los resultados en el entorno de gemelo digital permite visualizar y analizar la información de manera común, coherente, facilitando su interpretación por parte de diferentes perfiles de usuario. La capacidad de actualizar los resultados y comparar escenarios refuerza el papel de la herramienta como soporte a la gestión y planificación del edificio.



(a)



(b)



(c)

Figura 7. Interfaces de integración de la herramienta LCA-S-LCA en el gemelo digital CEMBOX. (a) Resumen de los parámetros de impacto ambiental en construcción y operación; (b) Resultados detallados del impacto ambiental de construcción en gráficas, permitiendo el filtrado entre etapas y elementos constructivos. (c) Integración de los gráficos de araña de la evaluación de impacto social.

En conjunto, la aplicación al caso de estudio demuestra que la metodología propuesta no solo es conceptualmente robusta, sino también aplicable en contextos reales, proporcionando información valiosa para mejorar el desempeño ambiental y social de los edificios a lo largo de su ciclo de vida. La figura 7 muestra tres interfaces distintas correspondientes a la integración de la herramienta LCA-S-LCA en el gemelo digital.

## 6 Conclusiones

El presente trabajo ha desarrollado y validado una metodología integrada para la evaluación del desempeño ambiental y social de edificios, basada en la combinación de enfoques LCA y S-LCA

e implementada en un entorno de gemelo digital. Esta aproximación permite superar las limitaciones de los métodos tradicionales, avanzando hacia una evaluación más completa, dinámica y orientada a la toma de decisiones.

Uno de los principales aportes del trabajo es la integración efectiva de las dimensiones ambiental y social dentro de un mismo marco metodológico. Esta integración permite analizar de forma conjunta los impactos asociados a materiales, energía y emisiones, así como aspectos relacionados con el bienestar de los usuarios y la interacción con el entorno urbano, aportando una visión más holística de la sostenibilidad en edificación. Asimismo, la incorporación de datos reales en fase de operación permite evolucionar desde modelos estáticos hacia evaluaciones dinámicas, capaces de reflejar el comportamiento real del edificio a lo largo del tiempo. Este enfoque mejora la precisión de los resultados y abre la puerta a una gestión más eficiente, basada en el seguimiento continuo de los indicadores y la detección de oportunidades de mejora.

El uso del gemelo digital como entorno integrador constituye otro elemento clave del trabajo, al permitir la conexión de fuentes de datos heterogéneas, la automatización de procesos de cálculo y la visualización integrada de resultados. Esta implementación facilita la interpretación de la información y refuerza el papel de la metodología como herramienta de apoyo a la toma de decisiones en diferentes fases del ciclo de vida del edificio. La aplicación a un caso de estudio real ha demostrado la viabilidad operativa de la metodología y su capacidad para identificar aspectos críticos del desempeño del edificio, tanto desde el punto de vista ambiental como social. En particular, la posibilidad de realizar un análisis integrado permite detectar sinergias y trade-offs entre diferentes objetivos de sostenibilidad, aportando una base más sólida para la planificación y gestión. No obstante, el trabajo también pone de manifiesto algunos retos asociados a la implementación de este tipo de enfoques, especialmente en lo relativo a la disponibilidad, calidad e integración de datos procedentes de distintas fuentes. Asimismo, la evaluación de la dimensión social presenta una mayor complejidad en términos de cuantificación, requiriendo metodologías flexibles y adaptables a distintos contextos.

Como líneas de trabajo futuro, se plantea la ampliación de la metodología a otros tipos de edificios y contextos urbanos, así como la incorporación de nuevos indicadores que permitan profundizar en la evaluación de la sostenibilidad. Del mismo modo, la mejora de los procesos de integración de datos y la incorporación de herramientas avanzadas de análisis y simulación podrían reforzar el potencial del gemelo digital como plataforma de gestión integral.

En conjunto, la metodología propuesta constituye una aportación relevante hacia la evaluación integrada de la sostenibilidad en edificación, proporcionando un marco reproducible y escalable que combina rigurosidad metodológica con aplicabilidad práctica en entornos reales.

## 7 Referencias

- [1] AENOR (2012). UNE-EN 15643-1. *Sostenibilidad en la construcción. Evaluación de la sostenibilidad de los edificios. Parte 1: Marco general.*
- [2] AENOR (2012). UNE-EN 15643-2. *Sostenibilidad en la construcción. Evaluación de la sostenibilidad de los edificios. Parte 2: Marco para la evaluación del comportamiento ambiental.*
- [3] AENOR (2012). UNE-EN 15643-3. *Sostenibilidad en la construcción. Evaluación de la sostenibilidad de los edificios. Parte 3: Marco para la evaluación del comportamiento social.*
- [4] European Committee for Standardization (CEN) (2014). *EN 16309. Sustainability of construction works. Assessment of social performance of buildings. Calculation methodology*
- [5] BIM-LCA consortium. *BIM-LCA: Integrating Building Information Modelling and Life Cycle Assessment for sustainable construction.* <https://bimlca.eu/es>