

PERSPECTIVA SOCIAL DE UN MARCO MODULAR ÓPTIMO: ANÁLISIS INTEGRAL DEL CICLO DE VIDA

SOCIAL PERSPECTIVE ON AN OPTIMIZED MODULAR FRAME: INTEGRATED LIFE CYCLE ANALYSIS

Andrés Ruiz-Vélez¹, Julián Alcalá¹, Moacir Kripka², Víctor Yepes¹

¹ Instituto Universitario de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH), Universitat Politècnica de València, Valencia, España. E-mail: aruivel@doctor.upv.es, jualgon@upv.es, vyepes@cst.upv.es

² Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGEng), Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, Brasil. E-mail: mkripka@upf.br

RESUMEN

La perspectiva social es un aspecto fundamental en la construcción de infraestructuras sostenibles. Este estudio evalúa el análisis de ciclo de vida social de un marco articulado prefabricado de hormigón armado optimizado económicamente. Mediante el análisis de la contribución por fases al daño social total se identifica la fabricación como la etapa más influyente en el impacto social de la estructura. Adicionalmente, se verifica que la estructura modular presenta un impacto especialmente reducido en la etapa de construcción y final de vida útil. El análisis de los materiales y procesos más contribuyentes señala al acero de la armadura pasiva como el principal responsable tras el daño social de la estructura, seguido, pero en menor medida, por el hormigón y transporte. Los resultados destacan la importancia de considerar aspectos sociales en el desarrollo de la infraestructura de transporte, proporcionando información valiosa para responsables y partes interesadas en la toma de decisiones. **Palabras clave:** Marco articulado, prefabricado, análisis de ciclo de vida, optimización, sostenibilidad social.

ABSTRACT

The social perspective is a crucial aspect of constructing sustainable infrastructures. This study assesses the social life cycle analysis of an economically optimized precast reinforced concrete articulated frame. The manufacturing stage is identified as the most influential in the structure's social impact by analyzing the phased contribution to the overall social damage. Furthermore, it is confirmed that the modular structure exhibits notably minimal impact during the construction and end-of-life stages. The analysis of the most significant materials and processes indicates that passive reinforcing steel is primarily responsible for the social damage of the structure. While the contribution of concrete and transportation is comparatively lower, it remains relevant across the four categories of damage examined. These findings underscore the significance of considering social aspects in transportation infrastructure development and offer valuable insights for decision-makers and stakeholders. **Key words:** Hinged frame, precast, life cycle analysis, optimization, social sustainability.

1. INTRODUCCIÓN

La construcción y mantenimiento de una infraestructura de transporte adecuada juega un papel vital en el desarrollo de un país (Sierra *et al.*, 2017). Una buena red de carreteras asegura la distribución de bienes y conecta a las personas, algo que trasciende consideraciones meramente económicas (Vitorio-Junior y Kripka, 2017; Navarro *et al.*, 2021). Tradicionalmente, los aspectos técnicos y económicos han sido las claves más influyentes a la hora de crear y ejecutar proyectos de construcción (Ramesh *et al.*, 2010; Yepes *et al.*, 2008). Sin embargo, evaluar las implicaciones sociales asociadas a soluciones estructurales comunes es fundamental para asegurar que el desarrollo de la industria promueva la igualdad y el bienestar social, alineándose con los principios de sostenibilidad (Milani *et al.*, 2020; Zhou *et al.*, 2021).

La viabilidad económica y los impactos ambientales son las dimensiones que se consideran actualmente en la planificación y toma de decisiones concernientes a la infraestructura de transporte (Ansah *et al.*, 2022; Sierra *et al.*, 2018). Sin embargo, la mejora del conocimiento derivada de la actividad académica, respaldado por medidas gubernamentales cada vez más comunes como la implantación de la Agenda 2030 (ONU, 2015), dan lugar a una creciente concienciación sobre el impacto que estos proyectos tienen sobre el tejido social de las comunidades (Vitorio-Junior *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2022). Excluir la dimensión social elimina la consideración de uno de los tres pilares de la sostenibilidad, limitando el conocimiento sobre los posibles beneficios o perjuicios que la construcción de una determinada estructura puede acarrear sobre individuos, comunidades locales, o la sociedad en general (Martínez-Muñoz *et al.*, 2022; Pons *et al.*, 2018a).

Este estudio busca ampliar el conocimiento sobre las métricas de sostenibilidad social de una solución estructural muy común en la red de carreteras española, los Marcos Articulados Prefabricados de Hormigón Armado (MAPHA). La optimización económica de esta tipología se abordó en Ruiz-Vélez *et al.* (2022), donde se obtuvo un diseño con coste altamente restringido mediante el planteamiento del proceso de diseño como un problema de optimización combinatoria (Kripka *et al.*, 2013; Temur, 2021), y la posterior resolución de este mediante un algoritmo de recocido simulado híbrido con operación de mutación (Ruiz-Vélez *et al.*, 2022b). Estudios posteriores abordaron la parametrización de métricas de sostenibilidad ambiental para estructuras similares, consiguiendo una imagen del impacto ambiental asociado a estructuras de este tipo (Ruiz-Vélez *et al.*, 2023). De esta forma, la motivación del estudio queda respaldada por el interés de ahondar en las consecuencias sociales de esta estructura óptima, promoviendo una aproximación integral a la sostenibilidad de los MAPHA (Penadés-Plà *et al.*, 2019).

En este contexto, se modela y analizan los resultados del Análisis del Ciclo de Vida Social (ACVS) para cuantificar el impacto social del MAPHA óptimo. El estudio se centra en la evaluación de resultados finales del ACVS, analizando categorías de daño relativas a la comunidad local, la sociedad, los actores de la cadena de valor o los trabajadores (Navarro *et al.*, 2018a). Centrarse en los resultados finales permite proporcionar una imagen clara sobre el rendimiento social del MAPHA de presupuesto altamente restringido, identificando aspectos especialmente influyentes y posibles áreas donde existe una notable mejora potencial (Kripka *et al.*, 2019; Pons *et al.*, 2018). El estudio profundiza en la contribución de las diferentes fases del ciclo de vida al impacto social de la estructura mediante un análisis comparativo (Wang *et al.*, 2022, Zhou *et al.*, 2020). Además, se analiza el árbol de contribución del modelo de ciclo de vida, identificando los procesos y materiales más influyentes en el ACVS (Sánchez-Garrido *et al.*, 2015). En conjunto, los resultados conforman una herramienta útil para la formulación de estrategias e intervenciones específicas que mejoren la sostenibilidad social de futuros proyectos de MAPHA.

La investigación conforma una contribución promoviendo la cada vez más relevante tendencia consistente en evaluar los impactos sociales de estructuras propias de la infraestructura de transporte.

Los resultados y conclusiones conforman una herramienta relevante para los responsables políticos, los promotores de infraestructuras y las partes interesadas que toman parte en los procesos de toma de decisiones, ya que promueven un enfoque más equilibrado y socialmente sostenible para el desarrollo de la infraestructura de transporte.

2. METODOLOGÍA

El estudio hizo uso de la herramienta de código abierto OpenLCA para la creación y cálculo del modelo de ACVS (Ciroth, 2007). La información necesaria para la evaluación del daño social se obtuvo de PSILCA a través de la base de datos SOCA v2, fuentes vastamente respaldadas en el ámbito académico (GreenDelta, 2013). El impacto social fue evaluado mediante el Método del Impacto Social Ponderado (MISP), consiguiendo traducir 55 categorías de impacto social a 4 categorías de daño mucho más representativas (Navarro *et al.*, 2018b). Siguiendo las indicaciones estipuladas en la normativa europea vigente, se llevaron a cabo cuatro etapas: la definición de los objetivos y el alcance del estudio, el análisis de inventario del modelo, la evaluación del impacto social y la interpretación de los resultados (CEN, 2006a, 2006b). Esta sección está dedicada a detallar cada una de las cuatro etapas mencionadas anteriormente.

2.1. Definición de Objetivos y Alcance

El objetivo principal del estudio fue proporcionar una imagen clara sobre la sostenibilidad social del MAPHA óptimo presentado en Ruiz-Vélez *et al.* (2022). Esto pasó por la consecución de tres objetivos secundarios: se analizó la contribución de cada una de las fases del ciclo de vida del MAPHA, se evaluó la contribución de los principales procesos y materiales, y se caracterizaron las categorías de daño finales del ACVS.

Modelar el ciclo de vida de una estructura propia de la infraestructura de carretera es un proceso complicado que se ve limitado por la información disponible, el coste computacional y las hipótesis necesarias para su definición. En este contexto, el estudio planteó el modelo de la figura 1.

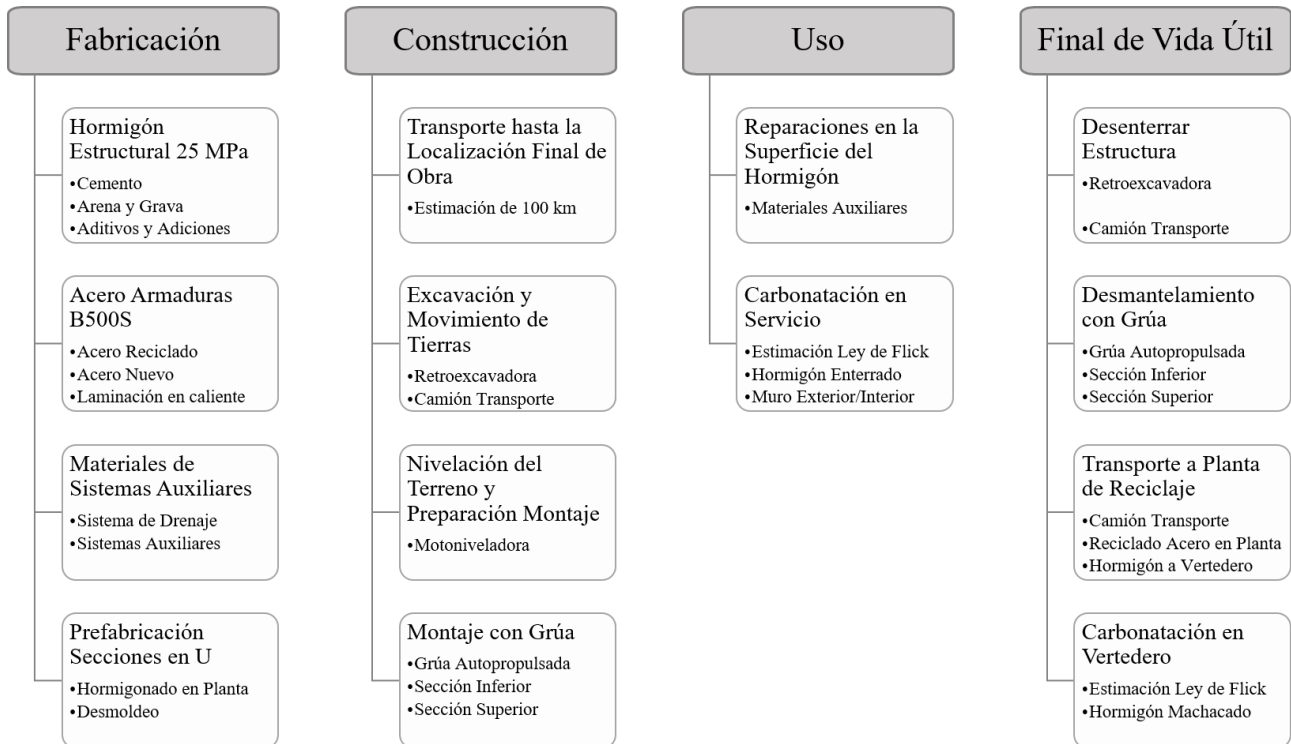


Figura 1. Modelo del ciclo de vida del MAPHA óptimo.

El ciclo de vida del MAPHA óptimo abarca cuatro etapas: fabricación, construcción, uso y final de la vida útil. La fase de fabricación implica todos los procesos desde la extracción de materia prima hasta la obtención de productos listos para su uso en obra. En el caso de estudio, esto comprendió la fabricación y transporte de hormigón estructural, acero para la armadura pasiva, materiales para sistemas auxiliares, y la propia prefabricación en planta de las secciones en U que conforman el MAPHA.

La fase de construcción comienza con el transporte, hasta la localización de la obra, de todos los productos y maquinaria necesarios para completar el proyecto. La construcción del MAPHA es un proceso directo, en primer lugar, se extrae la tierra necesaria para su colocación, se nivela el terreno y se disponen sistemas auxiliares de drenaje. Tras esto, una grúa posiciona las piezas que conforman el conjunto estructural.

El final de la fase de construcción da comienzo a la vida útil estándar de 100 años. Durante este tiempo los marcos de carretera pueden sufrir daños por filtraciones o carbonatación. El estudio trató de ser lo más representativo posible, por ello, se modelaron reparaciones superficiales en las caras internas de la estructura. Se modeló el proceso de carbonatación en servicio del MAPHA a través de la ley de Fick, correspondiente con la ecuación 1 (Martínez-Muñoz *et al.*, 2022).

$$CO_2 \text{ Fijado} = 0,383 \cdot \frac{k_1 \cdot t^{0.5}}{1000} \cdot A \cdot C \cdot k \quad [1]$$

Donde el cálculo de los kg de dióxido de carbono fijados mediante carbonatación es función de una constante de carbonatación (k_1), el periodo de vida útil de la estructura en años (t), la superficie carbonatada (A), el contenido de cemento (C) y el porcentaje de Clinker (k). La dosificación del hormigón estructural del MAPHA óptimo puede consultarse en la tabla 1. Las constantes de carbonatación se diferenciaron para muros externos e internos, así como hormigón machacado (Lagerblad, 2005).

Tabla 1. Dosificación del hormigón estructural del MAPHA.

Material	Cantidad
Cemento (kg/m ³)	305,00
Arena (kg/m ³)	735,00
Grava (kg/m ³)	1110,00
Superplastificante (kg/m ³)	0,31
Agua (kg/m ³)	202,50

Tras el final de la vida útil de la estructura, comienza la etapa de final de la vida útil. Esta etapa final valora los procesos para el desmantelamiento del MAPHA, así como el posterior reciclaje de sus materiales. Además, se considera que el hormigón machacado se termina de carbonatar en el vertedero. Se consideró el metro lineal como unidad de cálculo funcional, decisión fundamentada en los procesos de cálculo estipulados en norma (CEN, 2009, 2013; MFOM, 2009, 2011). En conjunto, la correcta definición y posterior modelado de las cuatro etapas permitió la obtención de resultados representativos de alta calidad.

2.2. Análisis de Inventario

El análisis de inventario consistió en compilar toda la información necesaria sobre los materiales y recursos consumidos a lo largo del ciclo de vida del MAPHA óptimo. La obtención de información sobre los recursos materiales necesarios fue directa, extrayendo la información necesaria de las

características del diseño óptimo obtenido en Ruiz-Vélez et al. (2022). En este contexto, las cantidades de los principales materiales y procesos considerados son presentados en la tabla 2.

Tabla 2. Unidades y cantidades de los principales materiales y procesos.

Material		Cantidad
Hormigón estructural HA-25	(m^3)	18,03
Acero armadura pasiva B 500 S	(kg)	1.442, 07
Tierra de relleno	(m^3)	101,83
Transporte materiales a obra	(km)	100,00
Arena de nivelación	(kg)	1620,50
Carbonatación en servicio	($kg CO_2$)	124,14
Excavación previa a montaje	(m^3)	5,12
Excavación desmantelamiento	(m^3)	57,06
Transporte acero a planta de reciclaje	(km)	50
Trituración de hormigón	(t)	44,87
Transporte hormigón a vertedero	(km)	10
Carbonatación en vertedero	($kg CO_2$)	1.508,80

2.3. Evaluación de Impacto

La evaluación de impacto de cualquier ACVS depende de la metodología considerada en el cálculo del impacto social. El estudio hizo uso del MISP para el cálculo de los impactos sociales asociados al ciclo de vida de un metro lineal de MAPHA óptimo. Este método computa los parámetros introducidos en el modelo del ciclo de vida del MAPHA, proporcionando resultados de impacto social para un total de 55 categorías de impacto. Estas categorías consideran aspectos muy específicos, se miden en diferentes unidades y presentan órdenes de magnitud diversos. Esto hace que su análisis conforme una tarea compleja que dificulta la obtención de una imagen clara sobre la sostenibilidad social de la estructura bajo estudio.

El beneficio de la metodología de evaluación de impacto MISP es la posibilidad de computar esas 55 categorías de impacto, transformándolas en 4 categorías de daño: daño a la comunidad local, a la sociedad, a los actores de la cadena de valor y a los trabajadores. Todas ellas tienen la misma unidad de medida, el riesgo medio por hora (mrh), algo que elimina los problemas asociados a las diferencias de magnitud, facilitando el análisis y la realización de comparaciones directas y, en conclusión, soportando la obtención de una imagen clara y representativa del daño social durante el ciclo de vida del MAPHA óptimo.

El estudio planteó un método para el análisis y evaluación integral de los resultados finales del ACVS, representado mediante el diagrama de Sankey de la figura 2. Este proporciona tanto una imagen inicial de los flujos existentes, su magnitud, y la evolución que tuvo la investigación. En primer lugar, se estudió la contribución de cada una de las fases del ciclo de vida al daño social total, algo que comprende estudio de valores absolutos y contribuciones porcentuales. Los resultados permiten identificar la fase más contribuyente, permitiendo focalizar estrategias de mitigación de daño social en aquellas etapas más dañinas.

Tras ello, se dio paso al análisis de la contribución de los principales procesos, algo que, de forma análoga considera contribuciones totales y porcentuales. Igualmente, esto permitió identificar los

materiales más contribuyentes, conformando una herramienta de gran utilidad a la hora de proyectar una estructura de estas características.

Finalmente, el análisis por fases y por procesos y materiales permitió tener la información necesaria para plantear un análisis de las categorías de daño, consiguiendo así una aproximación integral a la sostenibilidad social del MAPHA óptimo. El uso de bases de datos con información actualizada y de calidad, en conjunto con la aplicación de una metodología de evaluación de impacto respaldada, permite cuantificar y caracterizar adecuadamente el daño social en el que la solución estructural bajo estudio incurre a lo largo de su ciclo de vida.

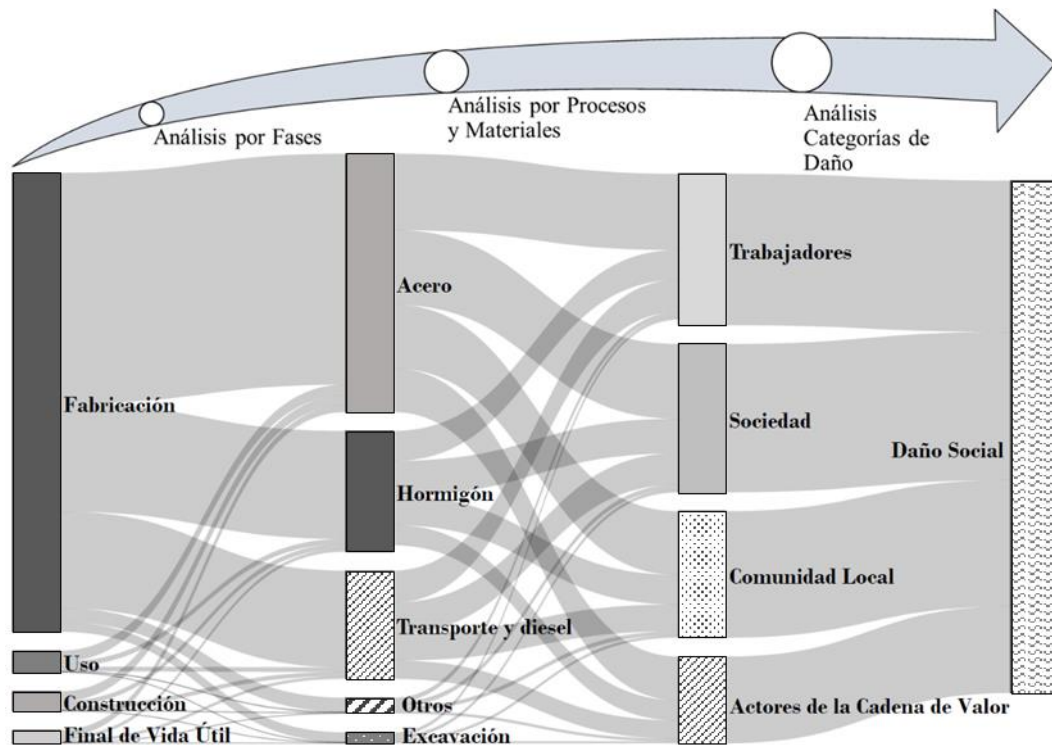


Figura 2. Método integral para la evaluación del impacto social del MAPHA.

2.4. Interpretación de los resultados

En la última de las cuatro etapas estipuladas en norma para el ACVS de estructuras de hormigón armado se analizan los resultados obtenidos. Una correcta interpretación de los resultados pasa por entender de forma adecuada las categorías de daño bajo estudio.

La categoría de comunidad local comprende las consecuencias sociales sobre las comunidades adyacentes a la localización del MAPHA. Mediante consideraciones como la contaminación acústica o cambios en el paisaje local, cuantifica la mejora o empeoramiento del bienestar y calidad de vida de la población cercana. Es una categoría especialmente relevante en proyectos de infraestructuras, donde se debe minimizar los impactos negativos, especialmente durante las fases de construcción. De esta forma, se promueve una relación comunitaria positiva, algo que promueve el desarrollo sostenible de la región.

La consideración de un impacto social más amplio de la construcción y explotación de la infraestructura de carretera da lugar a la categoría de daño a la sociedad. Mediante la evaluación de factores como la accesibilidad, el desarrollo económico o la fluidez del tráfico en la región, evalúa el bienestar y desarrollo económico de las comunidades. La infraestructura de transporte conecta personas y permite el desarrollo normal de las actividades industriales y comerciales. Consecuentemente, es

necesario cuantificar y considerar el impacto social de las estructuras en la toma de decisiones, consiguiendo una aproximación más válida desde el punto de vista de la sostenibilidad.

La tercera categoría de daño evalúa el impacto social sobre las partes involucradas en la construcción del MAPHA, incluyendo a los proveedores, contratistas o fabricantes de materiales, entre otros. Analizando el uso de prácticas sostenibles y éticas en los procesos involucrados en el ciclo de vida del marco prefabricado, la categoría actores de la cadena de valor juega un papel muy relevante a la hora de asegurar la responsabilidad social en la industria de la construcción. La sostenibilidad a largo plazo de la industria responsable de la construcción de la infraestructura de transporte pasa por asegurar un trato justo y buenas prácticas entre las partes involucradas, destacando la relevancia de esta categoría.

Finalmente, el daño sobre los trabajadores es la cuarta y última categoría de daño analizada en el ACVS del MAPHA. Esta se centra en el impacto social sobre las personas directamente involucradas en la construcción de la estructura, abarcando tanto al ingeniero que la diseña como a los obreros que se encargan de construirla. Mediante consideraciones relacionadas con la salud y seguridad laboral, los horarios y carga de trabajo, salarios justos u oportunidades de desarrollo profesional, esta categoría busca evaluar y generar las herramientas necesarias para asegurar los derechos de los trabajadores.

3. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA SOCIAL

El enfoque integral del estudio permitió la obtención de resultados referentes a la contribución de cada fase y cada uno de los materiales o procesos principales del ciclo de vida. En conjunto, esto permitió obtener una imagen clara sobre la magnitud de cada una de las cuatro categorías de daño. En este contexto, esta sección es dedicada a la presentación y comentario de los principales resultados.

3.1. Fases del Ciclo de Vida

En primer lugar, se evaluó la contribución de cada una de las cuatro fases del ciclo de vida a cada categoría de daño. En este contexto, la tabla 3 presenta la contribución absoluta y porcentual de cada fase, a cada una de las cuatro categorías de daño, información representada en las figuras 3 y 4, respectivamente.

Se identificó la fabricación como la fase más contribuyente en todos los casos, con contribuciones absolutas que van desde un 85,27% en el caso de comunidad local, hasta un 93,25% en el caso del daño a la sociedad. Como consecuencia, la fase de fabricación tiene un impacto considerable sobre el daño social de los MAPHA, algo derivado de las tareas propias de la extracción de materia prima, así como las consecuencias que estas tienen en la sociedad. Además, es de esperar que estructuras modulares como el MAPHA analizado cuenten con un impacto significativo en la etapa de fabricación, algo inherente a los procesos intensivos necesarios para la prefabricación en planta de las secciones que componen el conjunto estructural final.

Tabla 3. Resultados del análisis de contribución por fases a cada categoría de daño social.

	Comunidad Local		Sociedad		Actores Cadena de Valor		Trabajadores	
	(mrh)	(%)	(mrh)	(%)	(mrh)	(%)	(mrh)	(%)
Fabricación	1,28E+06	85,27	1,65E+06	93,25	9,47E+05	91,86	1,58E+06	87,68
Construcción	7,35E+04	4,88	4,70E+04	2,66	3,35E+04	3,25	8,00E+04	4,44
Uso	8,52E+04	5,66	5,31E+04	3,01	3,66E+04	3,55	8,28E+04	4,60
Final de Vida Útil	6,31E+04	4,19	1,91E+04	1,08	1,38E+04	1,34	5,91E+04	3,28

Dando paso a la fase de construcción, se puede observar que esta aporta un 4,44% al daño social sobre los trabajadores. En general, las contribuciones son muy inferiores a la fase de fabricación, sin embargo, siguen siendo relevantes en el estudio conjunto del impacto social asociado al ciclo de vida del MAPHA. Es de esperar que la etapa de construcción conlleve alteraciones de ámbito local, desde el cierre de carreteras hasta contaminación concentrada debida a maquinaria de obra. En este contexto, la categoría más influenciada por la etapa de construcción es la comunidad local, sufriendo $7,35 \cdot 10^4$ mrh, algo equivalente a un 4,88% del total de la categoría. Por otra parte, la perspectiva amplia proporcionada por la categoría de daño a la sociedad, da lugar a que el daño local no sea tan influyente, incurriendo en $4,70 \cdot 10^4$, daño considerablemente inferior al descrito para la comunidad local.

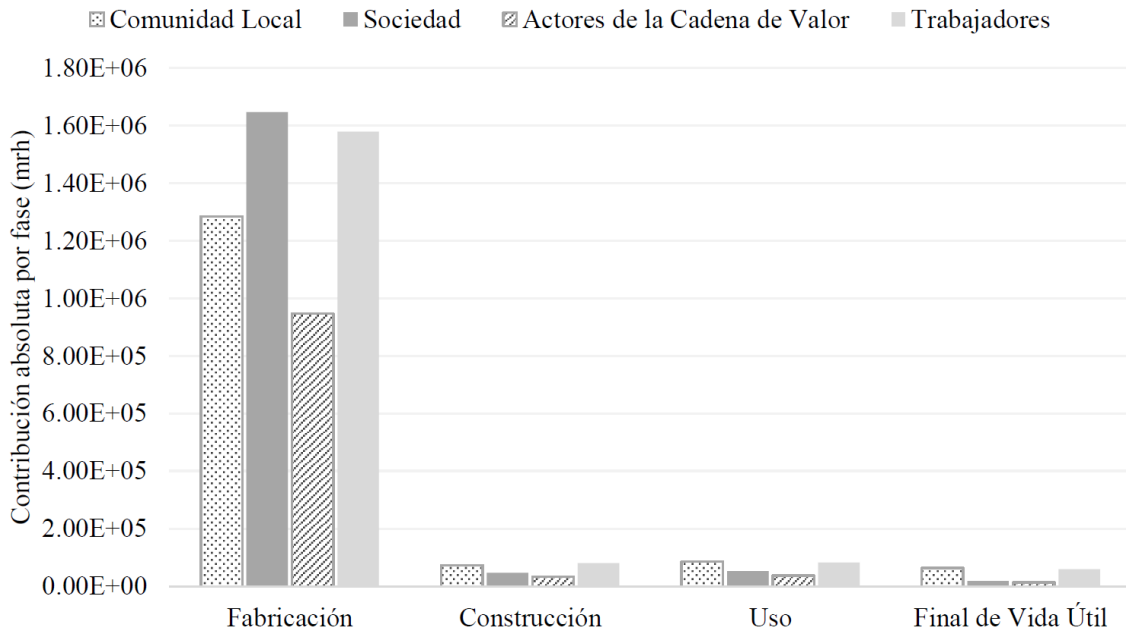


Figura 3. Contribución absoluta de cada fase del ciclo de vida al daño social de cada categoría.

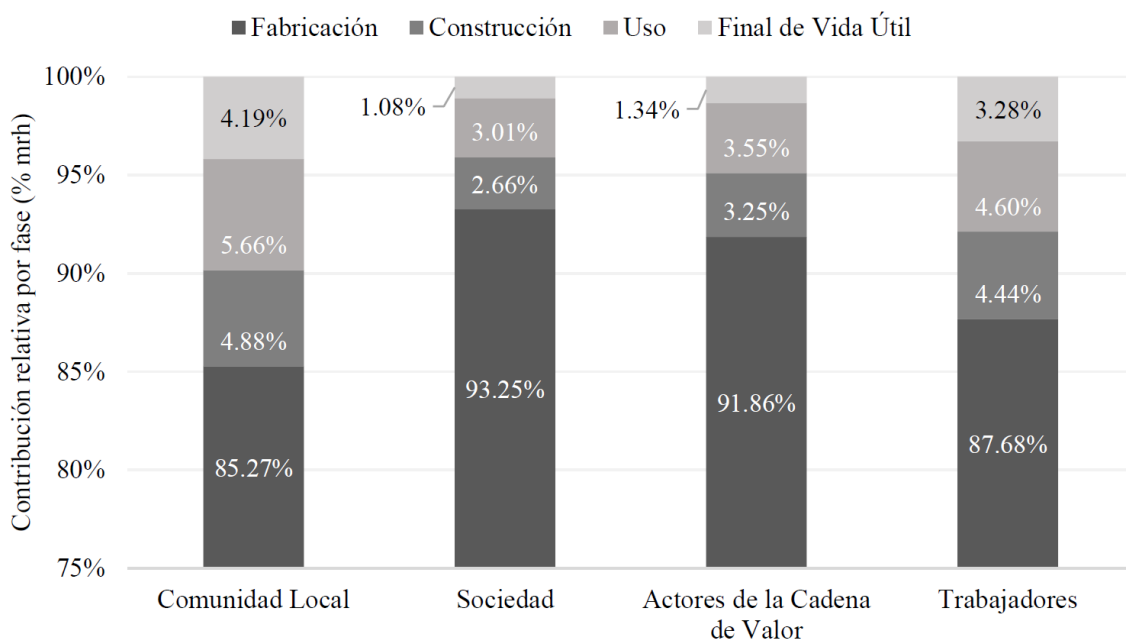


Figura 4 Contribución porcentual de cada fase del ciclo de vida al daño social de cada categoría.

Las fases de uso y final de vida útil presentaron contribuciones medias generalmente inferiores para todas las categorías de daño, oscilando entre el 1,08% y 4,19% y entre el 1,39% y 4,19%, respectivamente. Estas fases comprenden el uso de la estructura, los mantenimientos preventivos y su desmantelamiento, finalizando con la disposición y carbonatación en vertedero del hormigón machacado, o el reciclaje en planta del acero de las armaduras pasivas. En este contexto, es viable afirmar que los beneficios sociales derivados de la presencia del MAPHA óptimo consiguen contrarrestar en gran medida los impactos que tienen los procesos que conforman estas fases. En cualquier caso, es necesario tener en cuenta su contribución ya que siguen teniendo implicaciones sociales que afectan a todas las categorías de daño.

En general, los resultados proporcionan información relevante sobre el impacto de cada una de las fases del ciclo de vida del MAPHA. Con el objetivo de profundizar en el análisis, se estudió la contribución de cada una de las fases al daño social total. Además, se obtuvo la contribución porcentual de cada una de las categorías de daño. Los resultados del análisis, contenidos en la tabla 4, son representados mediante gráficos comparativos correspondientes a las figuras 5 y 6.

Tabla 4. Resultados del análisis de contribución por fases y categorías al daño social total.

	Contribución por fase al total		Comunidad Local	Sociedad	Actores Cadena de Valor	Trabajadores
	(mrh)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Fabricación	5,46E+06	89,40	23,53	30,16	17,36	28,94
Construcción	2,34E+05	3,83	31,42	20,07	14,32	34,18
Uso	2,58E+05	4,22	33,06	20,59	14,22	32,13
Final de Vida Útil	1,55E+05	2,54	40,69	12,30	8,91	38,10
Total	6,10E+06	100,00	24,67	28,92	16,90	29,51

El daño generado durante la fase de fabricación supone un 89,40% del impacto total social asociado al ciclo de vida completo del MAPHA óptimo. Este porcentaje, equivalente a $5,46 \cdot 10^6$ mrh, se distribuye de forma dispar, con un 30,16% del daño asociado a dicha fase afecte de forma directa a la sociedad. A su vez, un 17,36% impacte a los actores de la cadena de valor, siendo la categoría de daño menos afectada. Finalmente, la comunidad local y trabajadores presentan valores similares, de 25,53% y 28,94%, respectivamente.

La fase de construcción contribuye un 3,83% del daño social total, valor extremadamente inferior al destacado en la fase anterior. En cualquier caso, este impacto sigue siendo relevante, ya que supone la distribución de $2,34 \cdot 10^5$ mrh de daño social entre las cuatro categorías de daño. Nuevamente, la distribución afecta de forma más liviana a los actores de la cadena de valor, categoría que recibe un 14,32% del daño social generado durante la construcción del MAPHA óptimo. Por otra parte, los procesos inherentes a esta fase afectan de forma mucho más directa a la comunidad local, categoría que se ve impactada por un 31,42% del daño social durante esta etapa. Es más, la naturaleza y particularidades del proceso constructivo parecen incurrir daño de forma específica sobre los trabajadores, recibiendo un 34,18% del total de la fase. En general, se puede observar que la fase de construcción afecta de forma más directa a las partes involucradas en el emplazamiento final del MAPHA, y de forma mucho menos severa a los actores de la cadena de valor.

La tendencia de distribución del daño identificada anteriormente es aún más notable en el caso de la fase de uso. En este contexto, los resultados mostraron una polarización severa, donde un 33,06% de

los $2,58 \cdot 10^5$ mrh generados durante la fase afectan de forma directa a la comunidad local. Esto es una consecuencia directa de la naturaleza de los procesos de reparación preventiva, ya que el modelo generado considera el corte temporal de la carretera donde se sitúa el MAPHA óptimo, generando cortes en el tráfico local. De forma similar, otra gran parte del daño incurrido durante el uso afecta a los trabajadores, grupo que recibe un considerable 32,13% del daño social. La perspectiva generalista de la categoría de daño a la sociedad permite que los beneficios derivados del uso del MAPHA mitiguen en gran medida la forma en la que el impacto negativo de los procesos afecta al cómputo global de la fase de vida útil de la estructura.

Finalmente, la etapa de final de vida incurre en $1,55 \cdot 10^5$ mrh, equivalente a un menor, pero relevante, 2,54% del daño social total. En línea con lo visto hasta el momento, se identificó una distribución polarizada hacia la comunidad local y los trabajadores, categorías que recibieron el 40,69% y 38,10% del daño social de la etapa que comprende el desmantelamiento de la estructura.

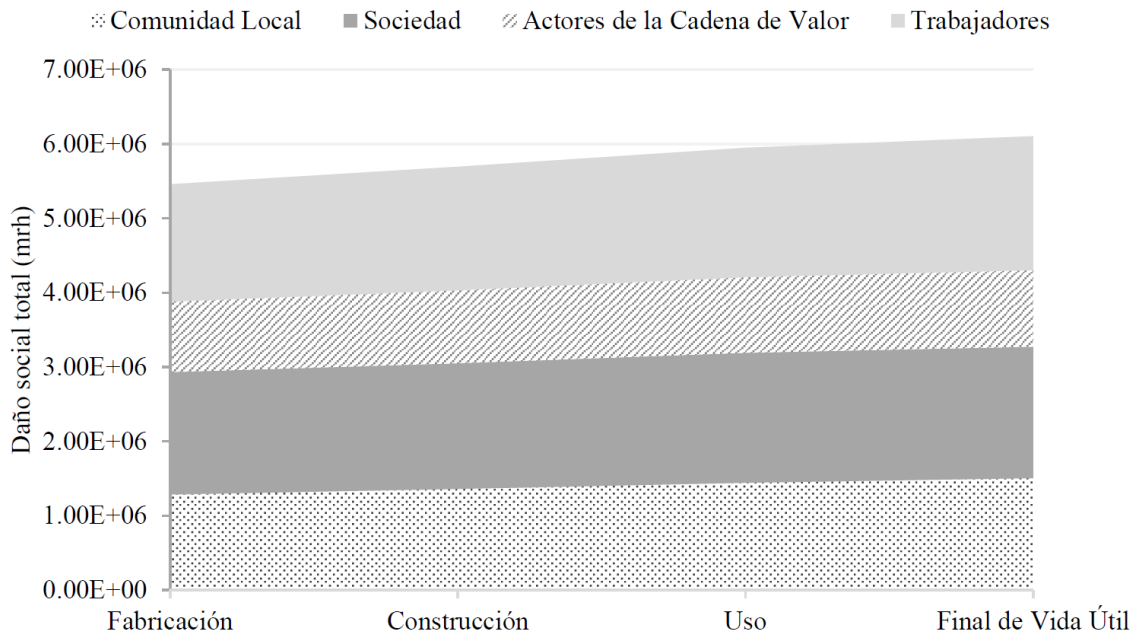


Figura 5. Evolución del daño social total en cada fase del ciclo de vida del MAPHA.

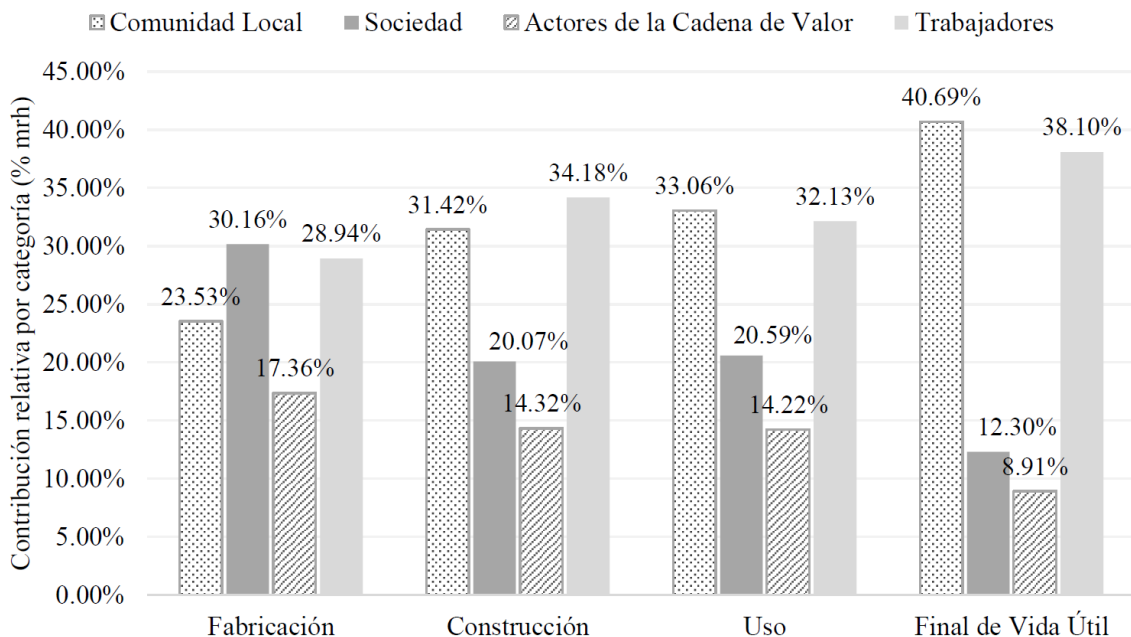


Figura 6. Contribución porcentual de cada categoría al daño social total de cada fase del ciclo de vida.

En general, el análisis de los resultados de contribución por fases permitió identificar la fabricación de los MAPHA como la fase más contribuyente al daño social de la estructura. Con aportaciones muy superiores al resto de las fases, es evidente que la naturaleza prefabricada de la estructura modular genera un impacto considerablemente superior en esta fase inicial de su ciclo de vida. Sin embargo, la simpleza del proceso constructivo del MAPHA permite que la fase de construcción conlleve un impacto social muy inferior, algo es especialmente interesante para las categorías más afectadas durante esta fase, la comunidad local y los trabajadores. Se identificó una tendencia interesante, demostrando que, conforme avanzan las etapas del ciclo de vida de la estructura, la distribución del daño social se polariza fuertemente hacia la comunidad local y los trabajadores.

3.2. Procesos y Materiales

Los resultados del análisis de la contribución por fases permitieron resaltar información relevante. El siguiente paso en la investigación fue analizar los resultados de la contribución al daño total de cada uno de los principales materiales y procesos. Se llevó a cabo un estudio análogo al presentado anteriormente para las fases del ciclo de vida del MAPHA, obteniendo las contribuciones absolutas y porcentuales de cada uno de los principales contribuyentes al daño social de la estructura. Los resultados principales del estudio son resumidos en la tabla 5, donde se detalla el daño absoluto y la contribución porcentual de los materiales y procesos a cada categoría de daño, información representada en las figuras 7 y 8, respectivamente.

Tabla 5. Resultados del análisis de contribución por material o proceso a cada categoría de daño social.

	Comunidad Local		Sociedad		Actores Cadena de Valor		Trabajadores	
	(mrh)	(%)	(mrh)	(%)	(mrh)	(%)	(mrh)	(%)
Hormigón	4,08E+05	27,10	5,07E+05	28,73	1,67E+04	1,62	4,93E+05	27,39
Excavación	7,05E+04	4,68	0,00E+00	0,00	0,00E+00	0,00	5,71E+04	3,17
Acero	8,17E+05	54,21	1,18E+06	67,01	0,00E+00	0,00	1,08E+06	59,79
Transporte/Diésel	1,79E+05	11,91	5,79E+04	3,28	9,13E+05	88,54	1,38E+05	7,67
Otros	3,16E+04	2,10	1,73E+04	0,98	1,01E+05	9,84	3,58E+04	1,99

El modelo de cálculo es un sistema complejo que cuenta con más de diez mil flujos internos que cuantifican los materiales y procesos del ciclo de vida, para transformarlos en múltiples métricas cuya evaluación da lugar a los impactos y daños sociales. En este contexto, una consideración completa de los materiales y procesos del modelo queda fuera del alcance del estudio. Por ello, se consideran los cuatro contribuidores principales al daño social, el hormigón, los procesos de excavación y movimiento de tierras, el acero, y el transporte o consumo de diésel en maquinaria. El daño social generado por el resto de materiales o procesos, equivalente al daño restante no derivado de los ya mencionados anteriormente, es sumado y considerado como un conjunto único. Es relevante destacar que algunos de los materiales incurren un daño liviano sobre ciertas categorías de daño, esto da lugar a que, debido a la precisión numérica del modelo, las diferencias de magnitud no permitan recoger estos valores. En este contexto, aquellos valores absolutos por debajo de un límite inferior son considerados nulos.

El análisis de los resultados permitió identificar al acero de las armaduras pasivas como el material más contribuyente al daño social sobre comunidades locales, sociedad en general, y los trabajadores. Con impactos de $8,17 \cdot 10^5$, $1,18 \cdot 10^6$ y $1,08 \cdot 10^6$, respectivamente, los procesos del ciclo de vida del acero de las armaduras pasivas del MAPHA óptimo contribuyen uno muy elevado 54,21%, 67,01% y 59,79%

del daño social sobre estas categorías. La producción de la armadura pasiva implica procesos con un consumo energético muy intensivo. En conjunto con la gran cantidad de minerales necesarios para su fabricación, el uso de este material genera impactos directos que contemplan desde la generación de ruido que afecta a los habitantes adyacentes a minas y plantas de procesado, hasta los riesgos físicos de diversa índole a los que se someten los actores de su cadena de valor y trabajadores. Siendo responsable de más de a mitad del daño social, es viable afirmar que el desarrollo de mejoras en los procesos inherentes al uso de este material sería una aproximación especialmente interesante en la mejora de la sostenibilidad de la tipología estructural bajo estudio.

Se cuantificó la contribución del hormigón estructural, observando aportaciones muy similares en las categorías de daño a la comunidad local, la sociedad y los trabajadores. Con resultados entre el 27,10% y 28,73%, estas categorías sufren una media de $4,70 \cdot 10^5$ mrh, algo que en conjunto supone un 98,93% del daño social derivado de los procesos inherentes al ciclo de vida del hormigón estructural de 25 MPa utilizado en la construcción del marco modular óptimo.

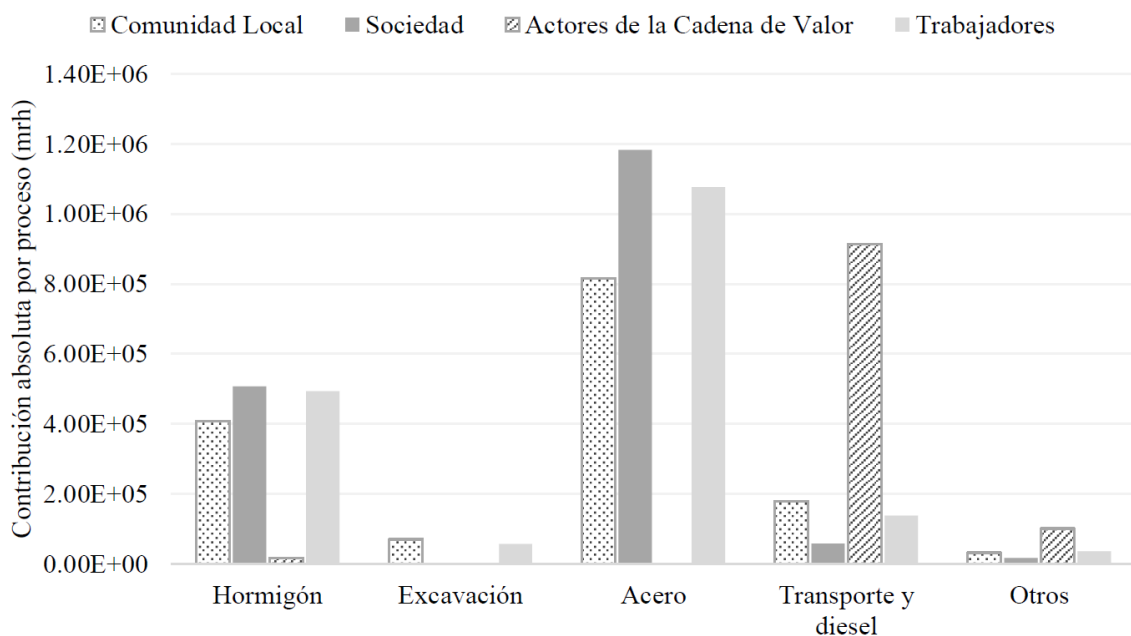


Figura 7. Contribución absoluta de cada material o proceso al daño social de cada categoría.

El uso de hormigón tiene beneficios como la mejora de la calidad de vida en las comunidades locales donde se construyen los MAPHA o la generación de puestos de trabajo, siendo base del sustento de trabajadores de múltiples industrias. Sin embargo, la producción de hormigón es un proceso muy contaminante, algo que tiene implicaciones serias a nivel local, social y sobre los trabajadores involucrados. Los resultados obtenidos son coherentes con la realidad, mostrando el impacto significativo derivado del uso de este material.

El tercer grupo engloba los procesos de transporte y el consumo de diésel en maquinaria autopropulsada. El ciclo de vida del MAPHA óptimo comprende múltiples traslados desde la extracción de materia prima a plantas de procesado, hasta la disposición del hormigón triturado en el vertedero. El modelo consideró los diferentes tipos de transporte necesarios para cada uno de ellos, asegurando que cumplieran los requisitos de peso y tamaño necesarios. Además de esto, este grupo considera la cantidad de diésel consumido por maquinaria de obra autopropulsada como grúas. En conjunto, estos procesos generan una media de $3,22 \cdot 10^5$ mrh sobre las categorías de daño, algo equivalente a un 27,85% de la contribución a cada categoría.

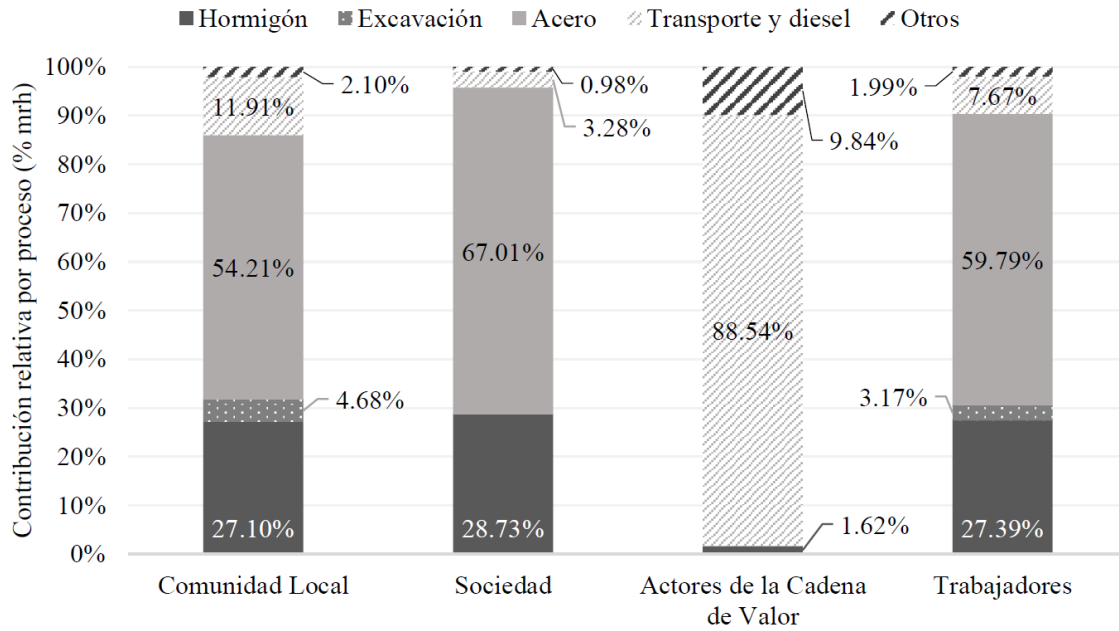


Figura 8. Contribución porcentual de cada material o proceso al daño social de cada categoría.

El análisis permitió identificar una tendencia en la aportación que dista mucho de lo descrito hasta el momento. Las principales implicaciones sociales del transporte y consumo de diésel impactan sobre los actores de la cadena de valor, categoría en la que estos procesos generan un 88,54% del daño social. Las implicaciones sociales de los procesos de transporte comprendidos en el ciclo de vida del MAPHA son serias. Los actores de la cadena de valor de la industria del traslado de cargas especiales y la operación de maquinaria pesada pueden enfrentarse a riesgos serios para la salud y su seguridad en el trabajo. La falta de formación o medidas de seguridad inadecuadas pueden provocar accidentes serios e incluso mortales, algo que justifica en gran medida la distribución que se identificó en los resultados.

Tabla 6. Resultados del análisis de contribución por materiales o procesos y categorías al daño social total.

	Contribución por material/Proceso al total		Comunidad Local	Sociedad	Actores Cadena de Valor	Trabajadores
	(mhrh)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Hormigón	1,43E+06	23,35	28,64	35,58	1,17	34,61
Excavación	1,28E+05	2,09	55,23	0,00	0,00	44,77
Acero	3,08E+06	50,40	26,54	38,45	0,00	35,01
Transporte/Diésel	1,29E+06	21,11	13,92	4,49	70,87	10,72
Otros	1,86E+05	3,05	16,99	9,29	54,49	19,24
Total	6,10E+06	100,00	24,67	28,92	16,90	29,51

Finalmente, los procesos de excavación, y el grupo restante que engloba los materiales y procesos con contribuciones mucho menores, aportan el daño restante a cada una de las categorías. El análisis de la contribución que cada uno de los procesos y materiales tienen a cada categoría de daño permitió identificar tendencias relevantes. En general, los resultados demostraron ser representativos, obteniendo

valores absolutos y contribuciones porcentuales que encajan con la realidad tras el ciclo de vida de una estructura de estas características.

La siguiente fase del análisis consistió en profundizar en la contribución de cada proceso y material al daño social total incurrido durante el ciclo de vida del MAPHA óptimo. En este contexto, los resultados del análisis son resumidos en la tabla 6 y representados en las figuras 9 y 10.

En concordancia con lo visto anteriormente, el acero presenta la mayor contribución, siendo responsable de algo más de la mitad del daño social total. La sociedad es la parte involucrada que sale peor parada, recibiendo un 38,45% del daño generado por el ciclo de vida del acero. No muy lejos, los trabajadores y la comunidad local reciben un 35,01% y 26,54% de los $3,08 \cdot 10^6$ mrh asociados a las armaduras pasivas de la estructura.

Por otra parte, el hormigón es responsable de un 23,35% del daño social total, algo equivalente a $1,43 \cdot 10^6$ mrh. Este daño social se distribuye de forma muy equilibrada entre la comunidad local, la sociedad y los trabajadores, grupos que reciben entre un 28,64%, 35,58% y 34,61%, respectivamente. El 1,17% restante supone unos poco despreciables 1.673,10 mrh que afectan a los actores de la cadena de valor del ciclo de vida del hormigón estructural del marco modular analizado.

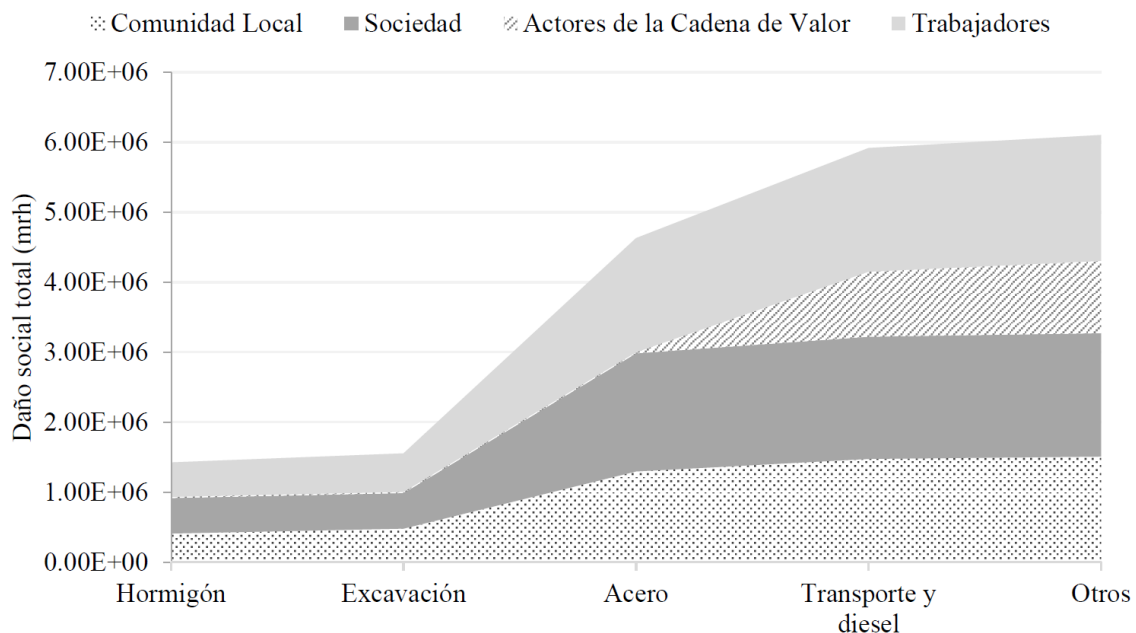


Figura 9. Evolución del daño social total para los materiales o procesos ciclo de vida del MAPHA.

El transporte y consumo de diésel contribuyen un 21,11% del daño social total, situándose muy cerca del hormigón. En línea con lo descrito anteriormente, los actores de la cadena de valor son la parte más afectada, percibiendo un 70,87% de los $1,29 \cdot 10^6$ mrh atribuidos a estos procesos.

La excavación previa al montaje del MAPHA óptimo durante su fase de construcción, en conjunto con el movimiento de tierras necesario para desenterrarlo a la hora de desmantelarlo en la fase de final de vida útil, contribuyen un 2,09%. El daño asociado a estos procesos se reparte de forma prácticamente equitativa entre la comunidad local y los trabajadores, algo de esperar ya que la comunidad local sufre las consecuencias directas de esta actividad en su entorno, y los trabajadores son expuestos a riesgos directos asociados al normal desarrollo de estas actividades. Finalmente, el conjunto de procesos englobado en otros supone un 3,05% del total.

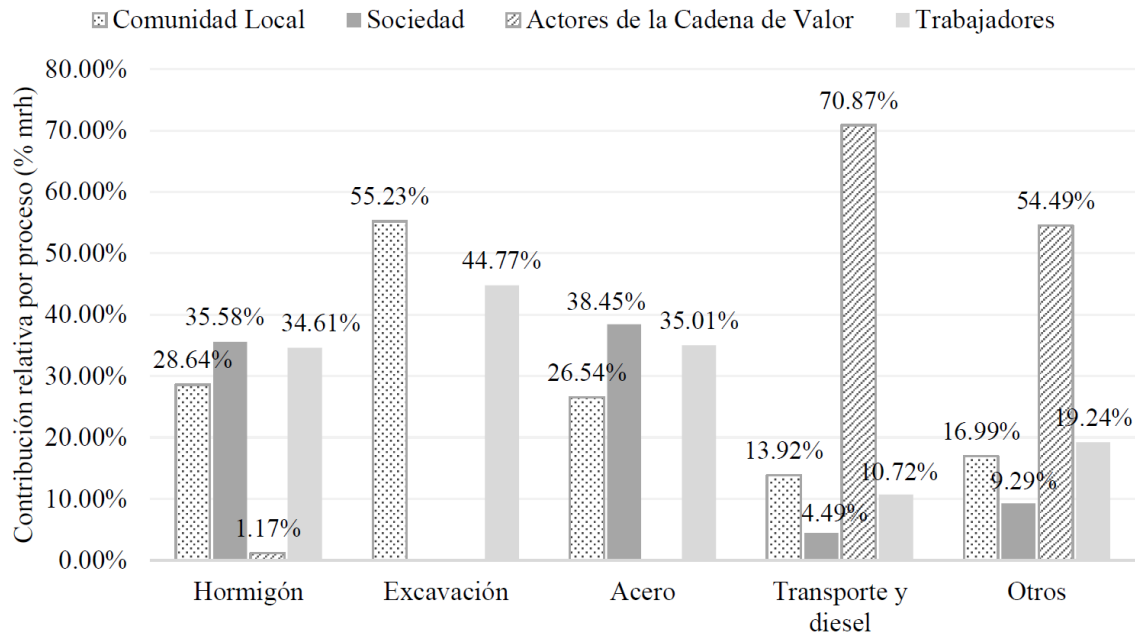


Figura 10. Contribución porcentual de cada categoría al daño social total de cada material o proceso.

El análisis de la contribución por materiales o procesos a cada una de las categorías de daño, y el consecuente estudio de la contribución equivalente al daño total asociado a cada uno de ellos, proporcionó una imagen valiosa sobre la sostenibilidad del MAPHA óptimo desde una perspectiva social.

3.3. Categorías de Daño

En vista de los resultados expuestos a lo largo de la sección, el paso final del estudio consistió en una evaluación global de la aportación, centrándose en los valores totales y más específicamente en la contribución de cada una de las categorías al daño social total. En este contexto la tabla 7 resume la contribución absoluta y porcentual de cada una de las categorías de daño social evaluadas durante el análisis del ACVS del MAPHA óptimo.

Tabla 7. Resumen de la contribución de cada categoría de daño al daño social total del ciclo de vida del MAPHA.

	Comunidad Local	Sociedad	Actores Cadena de Valor	Trabajadores	Daño Social Total
Absoluto (<i>mrh</i>)	1,51E+06	1,77E+06	1,03E+06	1,80E+06	6,10E+06
Relativo (%)	24,67	28,92	16,90	29,51	100,00

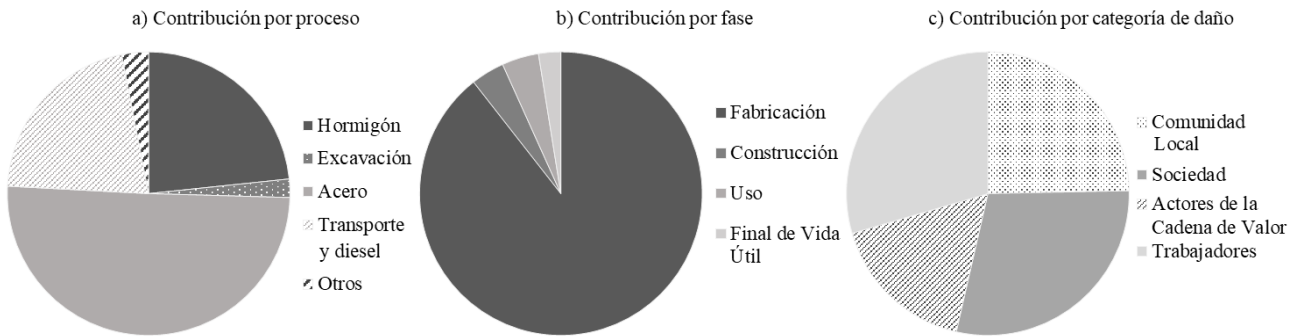


Figura 11. Contribución al daño social total donde: a) Contribución de cada material o proceso; b) Contribución de cada fase del ciclo de vida; y c) Contribución de cada categoría de daño.

La figura 11a representa la contribución al daño total de cada uno de los procesos, proporcionando una imagen clara y concisa que permite visualizar de forma directa la considerable contribución del acero, seguido de contribuciones muy inferiores, y prácticamente iguales, del hormigón y transporte.

La figura 11b representa la contribución por fases, siendo evidente la gran diferencia existente entre la aportación durante la construcción, y la aportación del resto de fases del ciclo de vida del MAPHA. En cualquier caso, el análisis desarrollado a lo largo de esta sección profundizó en estos resultados, identificando tendencias relevantes en la distribución por fases para cada categoría de daño.

Finalmente, la figura 11c muestra la contribución de cada una de las categorías de daño al daño social total asociado al ciclo de vida completo del MAPHA óptimo analizado. En conjunto, el ciclo de vida genera un total de $6,10 \cdot 10^6$ mrh de daño social, afectando de forma más severa a los trabajadores, quienes perciben un 29,51% del total. Seguido de cerca por la sociedad y comunidad local con un 28,92% y 24,67%, respectivamente. Finalmente, los actores de la cadena de valor soportan un inferior, pero todavía significativo 16,90% del daño social, algo equivalente a $1,03 \cdot 10^6$ mrh.

4. CONCLUSIONES

El estudio plantea una evaluación integral de la sostenibilidad de un MAPHA, algo que se consigue mediante el análisis de ciclo de vida social de una estructura optimizada económicamente. Mediante el desarrollo de un modelo de ciclo de vida, compilación de la información necesaria y cálculo del impacto social se obtienen resultados referentes al daño social que se puede atribuir al ciclo de vida de la estructura modular bajo estudio. Se profundiza en el estudio de los resultados mediante un análisis de contribución por fases. Adicionalmente, se evalúa la contribución de los principales procesos y materiales al daño social de cada una de las categorías de daño del ACVS. Finalmente, se consigue una perspectiva global del daño social mediante la evaluación de las contribuciones totales. En conjunto, se presentan resultados representativos que muestran una imagen clara y detallada de la sostenibilidad social del MAPHA óptimo. En vista de los resultados, bajo las hipótesis tomadas para este caso de estudio concreto, los autores consideran viable sacar la serie de conclusiones especialmente relevantes que se presentan a continuación.

La fabricación del MAPHA es la fase de su ciclo de vida que más contribuye a todas y cada una de las categorías de daño social evaluadas. Este comportamiento concuerda con la realidad tras los procesos necesarios para la prefabricación en planta de las secciones que componen el conjunto estructural. Reducir el daño social durante la fase de fabricación conforma una vía de mejora que ha de ser explorada. Consecuentemente, los esfuerzos enfocados al desarrollo de medidas específicas para mitigar el daño social de los marcos modulares deberán centrarse especialmente en esta fase, sin obviar posibles mejoras en etapas posteriores del ciclo de vida de la estructura.

La fase de construcción del MAPHA incurre un impacto reducido, algo que se consigue gracias a relativa sencillez de su proceso constructivo, consistente en montaje mediante grúas en su localización final. El daño social asociado a esta etapa afecta especialmente a la comunidad local, algo asociado a los cortes de tráfico, modificaciones en el paisaje de la zona, o contaminación acústica, que los habitantes de zonas colindantes al MAPHA han de soportar durante esta etapa de su ciclo de vida. En este contexto, el hecho de que el marco modular genere un impacto muy reducido durante esta etapa muestra una imagen positiva sobre el uso de esta tipología estructural en zonas donde este tipo de daño pueda ser especialmente influyente. Consecuentemente, los resultados del estudio conforman una herramienta relevante para la toma de decisiones en el proceso de planificación de proyectos de infraestructura de carreteras.

El acero es el material más contribuyente al daño social durante el ciclo de vida del MAPHA, siendo responsable de más de la mitad del impacto social total. En conjunto, el hormigón y transporte contribuyen prácticamente lo mismo que el acero para las armaduras. Esto es consecuencia de los procesos intensivos inherentes al ciclo de vida de las armaduras, algo que destaca la importancia de tratar de mitigar el daño asociado al uso de este material.

El daño social total afecta de forma similar a la comunidad local, la sociedad y los trabajadores, categorías que comprenden partes importantes del daño social total. La categoría restante, referente a los actores de la cadena de valor, es afectada de forma mucho más leve, con daño principalmente derivado de los procesos de transporte y uso de diésel. Este comportamiento destaca la importancia de limitar los posibles peligros propios del transporte por carretera o el manejo de maquinaria pesada.

En general los resultados destacaron la importancia de centrar los esfuerzos de mejora en la fase de fabricación y en el uso de acero en la construcción de MAPHA. La optimización de esta estructura consiguió reducir en gran medida el uso de hormigón, consecuentemente presentó diseños de armado especialmente densos, algo que puede estar detrás de la muy significativa contribución de este material al daño social total del ciclo de vida del marco. En conjunto con la identificación de la distribución de daño social hacia la comunidad local y trabajadores conforme se desarrollan las etapas del ciclo de vida de la estructura, los hallazgos del estudio proporcionan una imagen representativa de la sostenibilidad social del MAPHA. Consecuentemente, conforman una herramienta especialmente interesante que puede ser utilizada en la toma de decisiones durante la planificación de este tipo de proyectos, informando y mejorando la sostenibilidad de la estructura.

Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación del proyecto PID2020-117056RB-I00 financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación MCIN / AEI / 10.13039 / 501100011033 y por “FEDER Una manera de hacer Europa”.

5. REFERENCIAS

ANSAH, M. K.; CHEN, X.; YANG H. X. A holistic environmental and economic design optimization of low carbon buildings considering climate change and cofounding factors. *Science of the Total Environment*, v. 821 de enero 2022.

CIROTH, A. ICT for environment in life cycle applications OpenLCA – A new open source software for life cycle assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 12, núm. 4, pág 209-210 de enero 2007.

COMITÉ EUROPEO DE NORMALIZACIÓN (CEN). Eurocódigo 1: Acciones en estructuras, Bruselas, Bélgica, 2009.

- COMITÉ EUROPEO DE NORMALIZACIÓN (CEN). Eurocódigo 2: Diseño de estructuras de hormigón. Bruselas, Bélgica, 2013.
- COMITÉ EUROPEO DE NORMALIZACIÓN (CEN). ISO14040:2006 Gestión ambiental: Análisis de Ciclo de Vida. Principios y marco de referencia, Bruselas, Bélgica, 2006a.
- COMITÉ EUROPEO DE NORMALIZACIÓN (CEN). ISO14044:2006 Gestión ambiental: Análisis de Ciclo de Vida. Requisitos y directrices, Bruselas, Bélgica, 2006b.
- GREENDELTA. PSILCA v1.0 – Product Social Impact Life-Cycle Assessment, Berlín, Alemania, 2013.
- KRIPKA, M.; OLIVEIRA NETO, L.; KRIPKA, R. M. L. Determinação do posicionamento ótimo de apoios em pontes. *Ciência & engenharia*, v. 22, núm. 2, pág. 29-36 de julio 2013.
- KRIPKA, M.; YEPES, V.; MILANI, C. J. Selection of sustainable short-span bridge design in Brazil. *Sustainability* v. 11, núm. 5, pág. 1307 de marzo 2019.
- LI, L.; LUAN, H. Y.; YIN, X. F.; DOU, Y. D.; YUAN, M. Q.; LI, Z. F. Understanding Sustainability in Off-Site Construction Management: State of the Art and Future Directions. *Journal of Construction Engineering and Management*, v. 148, núm. 11, pág de noviembre 2022.
- MARTÍNEZ-MUÑOZ, D.; MARTÍ, J.V.; YEPES, V. Social Impact Assessment Comparison of Composite and Concrete Bridge Alternatives. *Sustainability*, v. 14, núm. 9, pág 5186 de abril 2022.
- MILANI, C.J.; YEPES, V.; KRIPKA, M. Proposal of sustainability indicators for the design of small-span bridges. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 17, núm. 12, pág. 4488 de junio 2020.
- MINISTERIO DE FOMENTO (MFOM). Guía de cimentaciones en obra de carretera, Madrid, España, 2009.
- MINISTERIO DE FOMENTO (MFOM). IAP-11: Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera. Madrid, España, 2011.
- NAVARRO, I.J.; YEPES, V.; MARTÍ, J.V. Social life cycle assessment of concrete bridge decks exposed to aggressive environments. *Environmental Impact Assessment Review*, v. 72, pág. 50-63 de septiembre 2018a.
- NAVARRO, I.J.; YEPES, V.; MARTÍ, J.V. Sustainability life cycle design of bridges in aggressive environments considering social impacts. *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*, v. 9, núm. 2, pág. 93-107 de junio 2021.
- NAVARRO, I.J.; YEPES, V.; MARTÍ, J.V.; GONZÁLEZ-VIDOSA, F. Life cycle impact assessment of corrosion preventive designs applied to prestressed concrete bridge decks. *Journal of Cleaner Production*, v. 196, pág. 698-713 de septiembre 2018b.
- ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS (ONU). Transformar nuestro mundo: La Agenda 2030 para Desarrollo Sostenible, Nueva York, Estados Unidos, 2015.
- PENADÉS-PLÀ, V.; GARCÍA-SEGURA, T.; YEPES, V. Accelerated optimization method for low-embodied energy concrete box-girder bridge design. *Engineering Structures*, v. 179, pág. 556-565 de enero 2019.

- PONS, J.; PENADÉS-PLÀ, V.; YEPES, V.; MARTÍ, J. V. Life cycle assessment of earth-retaining walls: An environmental comparison. *Journal of Cleaner Production*, v. 192, pág. 411-420 de agosto 2018.
- RAMESH, T.; PRAKASH, R.; SHUKLA, K. K. Life cycle energy analysis of buildings: An overview. *Energy and Buildings*, v. 42, núm. 10, pág. 1592–1600 de octubre 2010.
- RUIZ-VÉLEZ, A.; ALCALÁ, J.; KRIPKA, M.; YEPES, V. Optimización de marcos articulados prefabricados de hormigón armado mediante recocido simulado. *CIATEC-UPF*, v. 14, núm. 3, pág. 41-55 de diciembre 2022.
- RUIZ-VÉLEZ, A.; ALCALÁ, J.; YEPES, V. A parametric study of optimum road modular hinged frames by hybrid metaheuristics. *Materials*, v. 16, núm. 3, pág. 931 de enero 2023.
- RUIZ-VÉLEZ, A.; ALCALÁ, J.; YEPES, V. Optimal design of sustainable reinforced concrete precast hinged frames. *Materials*, v. 16, núm. 1, pág. 204 de diciembre 2022b.
- SÁNCHEZ-GARRIDO, A.J.; NAVARRO, I.J.; GARCÍA, J.; YEPES, V. A systematic literature review on Modern Methods of Construction in building: an integrated approach using machine learning. *Journal of Building Engineering*, v. 73, pág. 106725 de agosto 2015.
- SIERRA, L.A.; PELLICER, E.; YEPES, V. Method for estimating the social sustainability of infrastructure projects. *Environmental Impact Assessment Review*, v. 65, pág. 41-53 de julio 2017.
- SIERRA, L.A.; YEPES, V.; GARCÍA-SEGURA, T.; PELLICER, E. Bayesian network method for decision-making about the social sustainability of infrastructure projects. *Journal of Cleaner Production*, v. 176, pág. 521-534 de marzo 2018.
- TEMUR, R. Optimum design of cantilever retaining walls under seismic loads using a hybrid TLBO algorithm. *Geomechanics and Engineering*, v. 24, núm. 3, pág. 237-251 de febrero 2021.
- VITORIO-JUNIOR, P.C.; KRIPKA, M. Fair wage potential as a tool for social assessment in building projects. *Engineering Construction and Architectural Management*, v. 28, núm. 4, pág. 1295-1318 de abril 2021.
- VITORIO-JUNIOR, P.C.; YEPES, V.; KRIPKA, M. Comparison of Brazilian Social interest Housing Projects Considering Sustainability. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 19, núm 10, pág. 6213 de mayo 2022.
- WANG, J. J.; WANG, Y. F.; ZHANG, Y. R.; LIU Y. S.; SHI, C. C. Life cycle dynamic sustainability strategy optimization of fly ash RC beam based on Monte Carlo simulation. *Journal of Cleaner Production*, v. 351 de abril 2022.
- YEPES, V.; ALCALÁ, J.; PEREA, C.; GONZÁLEZ-VIDOSA, F. A Parametric Study of Optimum Earth Retaining Walls by Simulated Annealing. *Engineering Structures*, v. 30, núm. 3, pág. 821-830 de marzo 2008.
- ZHOU, Z.; ALCALÁ, J.; KRIPKA, M.; YEPES, V. Life cycle assessment of bridges using Bayesian Networks and Fuzzy Mathematics. *Applied Sciences*, v. 11, núm. 11, pág. 4916 de mayo 2021.
- ZHOU, Z.; ALCALÁ, J.; YEPES, V. Environmental, economic and social impact assessment: study of bridges in China's five major economic regions. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 18, núm. 1, pág. 122 de diciembre 2020.