

CONAMA 2022

CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

Técnicas de construcción
antiguas para reducir la
huella ambiental.



CONAMA 2022

TÉCNICAS DE CONSTRUCCIÓN ANTIGUAS PARA REDUCIR LA HUELLA AMBIENTAL

Autor Principal: Dolores Cima Cabal (UNIR Cátedra UNIR-AENOR)

Otros autores: Rebeca Sánchez Vázquez (UNIR); Pedro Muñoz Velasco (UNIR); Darío Córdova Llerena (UNIR)

ÍNDICE

1. Título
2. Palabras Clave
3. Resumen
4. Introducción
5. Metodología
6. Resultados
7. Discusión
8. Conclusiones
9. Bibliografía

TÍTULO

Técnicas de construcción antiguas para reducir la huella ambiental.

PALABRAS CLAVE

Paja, construcción, Impactos ambientales, Análisis de Ciclo de Vida, CML-IA, SimaPro.

RESUMEN

En los últimos años, los esfuerzos de algunos investigadores se han centrado en mejorar el diseño de edificios y encontrar materiales de construcción ecológicos para reducir la huella ambiental. Esta estrategia implica que las etapas de todo el ciclo de vida minimicen los impactos ambientales relacionados con el consumo de energía, el agotamiento de las materias primas y las emisiones de gases de efecto invernadero. Una alternativa factible se basa en el aprovechamiento de residuos que evitan el impacto ambiental de su disposición y además pueden mejorar el comportamiento de los materiales de construcción tradicionales. Se puede destacar un material ya utilizado en la antigüedad: los fardos de paja. Este estudio tiene como objetivo investigar los impactos ambientales generados por un edificio de 70m² de paja, desde la perspectiva “de la cuna hasta la tumba”. Además, se pretende comparar el mismo estudio con un edificio de similares características construido con ladrillos y determinar si existen mejoras significativas en términos de impactos ambientales y de huella de carbono. La edificación objeto de estudio es una casa unifamiliar de una planta de 70m², situada en Temuco (Chile), con ventanas de panel aislante de doble acristalamiento ($U_{eq} 1,44 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$) y una relación ventana-pared del 27%. La eficiencia energética del edificio se ha calculado en todo el ciclo de vida del edificio, los impactos ambientales y la huella de carbono. Esto, comparando los materiales de construcción de fardos de paja y ladrillo. Los resultados mostraron que el mayor porcentaje del consumo de energía durante la etapa de operación del edificio (50 años) se debe a la calefacción, mientras que la refrigeración puede ser insignificante debido a que la vivienda se encuentra en zona continental con clima frío. En el caso de los fardos de paja, se obtiene una reducción en el consumo de energía durante la etapa de uso del edificio de hasta un 20%. Los resultados muestran que el edificio de ladrillo tiene mayor aporte a los impactos ambientales así como a la huella de carbono, como consecuencia de la etapa de cocción, ya que es el proceso que consume la mayor cantidad de energía en el ciclo de vida del ladrillo. En el caso de los fardos de paja no requieren proceso de cocción. Además, para el propósito principal de este estudio, los fardos de paja fueron considerados como residuos de desecho recuperados durante el proceso de cosecha del trigo y residuos de ganadería. El empleo de fardos de paja como material de construcción mejora claramente la huella ambiental de la construcción desde “la cuna hasta la tumba”.

INTRODUCCIÓN

Según datos de la Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2021) y de la Comisión Europea (European Commission Agency, 2019) los edificios son responsables del 40 % del consumo de energía y del 36 % de las emisiones de CO₂ en la UE. El 11% de estas emisiones provienen de la fabricación de materiales y productos de construcción como acero, cemento y vidrio. Además, una vez que el edificio ha alcanzado el fin de su vida útil, los residuos de la construcción son el flujo de residuos más grandes de la Unión Europea. Un ciudadano europeo medio genera en torno a 160 toneladas de residuos de construcción y demolición en toda su vida. Cantidad que va aumentando con el tiempo (European Commission Agency, 2018).

Debido a esto, es importante establecer estrategias de mejora en el sector de la construcción desde una perspectiva global del edificio (Satori y Hestnes, 2007), “desde la cuna hasta la tumba” (Zabalza, 2012). Comenzando por el proceso de extracción de materias primas, ya que este proceso genera importantes impactos ambientales en el terreno, así como la emisión de CO₂ y otros gases contaminantes (Christoforou *et al.*, 2016). La fabricación de los materiales de construcción, así como su transporte hasta el emplazamiento y las actividades para la ejecución de la obra son etapas que generan también impactos negativos sobre el medio ambiente, como el consumo de materias primas y energía, emisión de gases contaminantes, etc. En la fase de operación, los edificios siguen consumiendo materias primas para su correcto mantenimiento, así como la energía necesaria para garantizar su óptimo funcionamiento (Muñoz *et al.*, 2017). Por último, en el fin de su vida útil, la demolición del edificio y la disposición final de los elementos constructivos son etapas que también impactan en el medioambiente generando residuos y consumiendo energía. Este enfoque global de todo el ciclo de vida de los edificios, permite seleccionar materiales más respetuosos con el medio ambiente y diseños arquitectónicos que requieren menor gasto energético. El empleo de energías renovables y el de materiales reciclados, permite disminuir el consumo energético de los edificios. Incluso, permite también disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero y los impactos negativos sobre el medio ambiente.

Una alternativa a los actuales materiales de construcción, como el cemento o el ladrillo, es el empleo de materiales empleados antiguamente, como es el caso del adobe o los fardos de paja. Los fardos de paja son materiales de construcción respetuosos con el medio ambiente, además son considerados buenos aislantes térmicos. Algunos autores como Pinto *et al.* (2011) o González (2014) han centrado sus investigaciones en el empleo de fardos de paja procedente de residuos de lino, cáñamo, yute, maíz y otros cereales, y han demostrado que el empleo de fardos de paja como material de construcción presenta buenas propiedades térmicas en condiciones de frío, buen aislante y baja conductividad térmica, por lo que presenta elevada resistencia a los cambios de temperatura. Además, la paja presenta la posibilidad de ser prensado con temperatura y presión, sin la necesidad de emplear resinas añadidas, por lo que hace que este material sea un producto con etiqueta verde (González, 2014). En la actualidad, los materiales biocompuestos basados en paja son un área de interés. Algunos países como EEUU, Francia, Austria y Alemania, han incorporado en sus códigos técnicos de la edificación el empleo de fardos de paja como material de construcción (Martínez, 2019).

Según datos de la FAO (IndexMundi, 2019), solo en España se generaron más de 24 millones de toneladas de cereal en el año 2018, estando en la posición 25 del ranking mundial de producción de cereal. En Asia se generaron más de 600 millones de toneladas y en EEUU más de 400 millones de toneladas, siendo la primera y segunda posición, respectivamente. Por cada tonelada de cereal que se puede consumir como alimento, se obtiene 1,5 toneladas de paja, lo que se emplea como residuo agrícola. En torno al 90% de este residuo se quema anualmente, emitiendo gases contaminantes a la atmósfera. Debido a esto, el empleo de fardos de paja como material de construcción permitiría disminuir la generación de residuos disminuyendo a su vez la emisión de gases contaminantes a la atmósfera (Martínez, 2019). Además, se debe tener en cuenta que los fardos de paja presentan importantes cantidades de CO₂ capturado del aire, por lo que su empleo en la construcción ayuda a reducir la concentración de CO₂ en la atmósfera (Bozsaky, 2019). Además, otra ventaja que presenta el empleo de paja en el sector de la construcción es que, al ser un elemento orgánico, los residuos generados una vez finalizado el tiempo de vida de los edificios, no generan contaminantes ni supone un impacto negativo para el medio ambiente. Además, debido a la elevada densidad de los fardos de paja es un material muy poco inflamable, ya que no presenta oxígeno suficiente en su interior (Bozsaky, 2019).

Otro factor a tener en cuenta es la capacidad estructural de los fardos de paja, ya que depende de muchas variables como la humedad, la densidad, el espesor o incluso el diseño del muro. La estabilidad de los fardos de paja y la capacidad estructural va a estar directamente relacionada con la compresión de los mismos. Para mantener la estabilidad del edificio, las balas de paja deben enmarcarse con una estructura de madera (González, 2014; Martínez, 2019; Bozsaky, 2019).

Por ello el objetivo de esta investigación es realizar un análisis comparativo de los impactos ambientales de un edificio de ladrillo convencional y el mismo edificio con estructuras de paja y madera. Para ello se ha empleado un análisis de ciclo de vida, desde “la cuna hasta a la tumba” del edificio. Así, el objetivo final de la presente investigación es determinar si hay mejoras importantes en términos de rendimiento energético, impactos ambientales y huella de CO₂. Los resultados obtenidos pretenden servir de guía a los nuevos diseñadores que estén considerando emplear estos materiales respetuosos con el medio ambiente.

METODOLOGÍA

Materiales y métodos.

El objetivo de la presente investigación es realizar un análisis comparativo de los impactos ambientales generados por un edificio con estructura de ladrillo y el mismo edificio con una estructura de paja y madera. La investigación se realizó teniendo en cuenta los procedimientos descritos en la norma ISO 14040 que cubre los análisis de ciclo de vida (ACV) y los estudios de inventario del ciclo de vida (ICV). El objetivo principal de este estudio es evaluar los principales impactos ambientales, así como el Potencial de Calentamiento Global (Kg CO₂eq) de una vivienda unifamiliar de ladrillo convencional y la misma vivienda pero construida con fardos de paja y madera. El estudio se centra en la adquisición de materias primas, la producción de los materiales de construcción, el transporte hasta el emplazamiento, la construcción del edificio,

las fases de operación y uso del edificio (50 años) y la demolición final del edificio. Por lo tanto, los límites del sistema para el ACV cubren el enfoque de “la cuna a la tumba” (Figura 1).

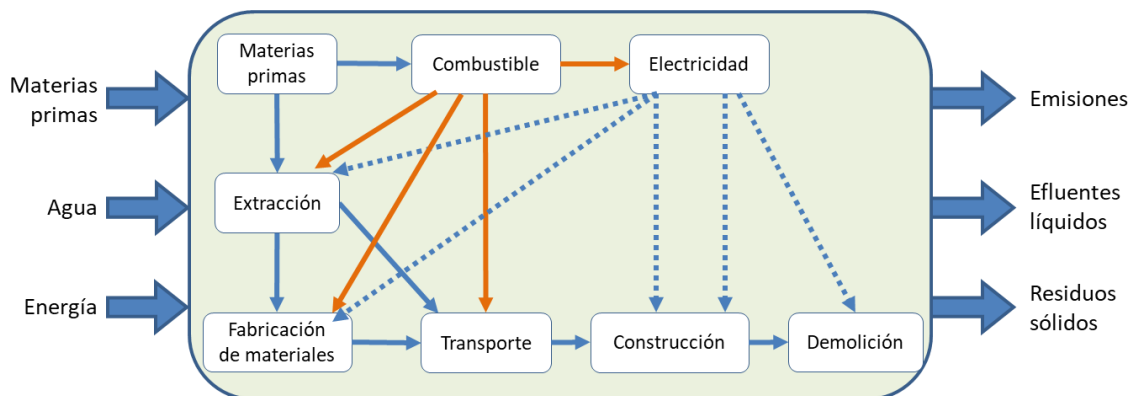


Figura 1. Límites del sistema para el ACV (Elaboración propia)

Análisis de Inventario.

Para elaborar la comparativa del ACV de ambos edificios se empleó el software SimaPro (LCA software, 2022) y la base de datos Ecoinvent 3.8 (Ecoinvent database, 2022).

- Fase 1: Construcción. Hace referencia a la extracción de materias primas, transporte y fabricación de los materiales, transporte al emplazamiento y construcción del edificio.
- Fase 2: Uso. Hace referencia a la etapa de uso y mantenimiento del edificio (50 años).
- Fase 3: Desmontaje del edificio.
- Fase 4: Fin de vida del edificio y transporte de los residuos a vertedero final.

La unidad funcional es una vivienda unifamiliar de una única planta, situada en Temuco (Chile), con una superficie de 70 m² en planta y 3 m de altura, teniendo en cuenta un periodo de tiempo de uso del edificio de 50 años. Se ha considerado la unidad funcional que se indica debido a que es comúnmente empleada y así poder ser comparada con otros autores de referencia y otros materiales de construcción (Muñoz *et al.*, 2017; Koura *et al.*, 2020; Koroneos y Dompros, 2007).

Todos los datos necesarios para la elaboración de los ACV de ambos edificios fueron recopilados a partir de los datos medidos de los materiales de construcción, datos proporcionados por la base de datos Ecoinvent 3.8 y datos calculados a partir de diferentes fuentes bibliográficas.

Para realizar el ACV se han tenido en cuenta las siguientes consideraciones:

- En el edificio de ladrillo se ha considerado desde la extracción de las materias primas para fabricar el ladrillo, hasta fin de vida del edificio y la disposición final de los elementos de construcción en vertedero.
- En el edificio de ladrillo también se ha considerado la extracción de las materias primas para la fabricación del cemento y su depósito final en vertedero.
- En el edificio de paja se ha considera el empleo de fardos de paja como residuos de la industria ganadera y agrícola.
- En el edificio de paja se ha considerado la madera necesaria para crear las estructuras de las paredes, puertas y ventanas del edificio.

Las características del ladrillo, cemento, paja y madera son las que se muestran en el cuadro 1, donde se muestra el espesor de los fardos de paja, la madera y el ladrillo. También se muestra la densidad de los materiales y la masa total necesaria para la construcción del edificio. En el caso del cemento se ha considerado un 5% del volumen total del ladrillo necesario para construir el edificio.

Cuadro 1. Cantidad de materiales de construcción en relación a la unidad funcional.

Propiedades	Fardos de Paja	Madera	Ladrillo	Cemento
Espesor [cm]	40	20	20	2
Densidad [kg m ⁻³]	100	500	1750	1860
Masa total [kg]	2777,22	694,31	24300,71	1291,41

Fuente: Elaboración propia

Durante la fase de uso del edificio, en este estudio se han considerado 50 años, el mayor porcentaje del consumo de energía se debe a las cargas térmicas que dependen principalmente del clima de la zona, la forma del edificio y el estilo de vida de los ocupantes. En este caso se han considerado ventanas de panel aislante de doble acristalamiento ($U_{eq} 1,44 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$) con una relación ventana a pared del 27%. Para establecer la tasa de calor metabólico se ha tenido en cuenta el flujo de calor de los ocupantes ($180 \text{ W persona}^{-1}$) y el nivel de ropa (es decir, 1 clo y 0,5 clo para invierno y verano, donde 1 clo representa $155 \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$) (Enescu, 2017). Las ganancias internas de la iluminación (200 lux) se han fijado en $5 \text{ Wm}^{-2} 100 \text{ lux}^{-1}$ con una fracción radiante del 42%, mientras que la cocina y otros aparatos eléctricos representan 150 Wm^{-2} y 50 Wm^{-2} , respectivamente con una fracción radiante del 20%. La renovación del aire se ha fijado en 3,0 renovaciones por hora, lo que incluye ventilación natural (debido a ventanas y puertas) e infiltraciones a través de las paredes.

El 80% de los hogares en Chile emplean madera (*Pinus radiata*) como fuente de energía primaria, debido a su bajo precio y elevada disponibilidad en la zona, por lo que es el combustible más consumido para la calefacción doméstica (Jorquera, Villalobos y Schauer, 2021). En el

Cuadro 2 se muestra el consumo de energía para aclimatación de ambos edificios en un año, considerando la madera *Pinnus radiata* como fuente de energía primaria (poder calorífico 2800 Kwh y un rendimiento de combustión del 85%).

Cuadro 2. Consumo de energía de ambos edificios en un año.

Kwh año ⁻¹	Edificio de Paja	Edificio de Ladrillo
Calentamiento	1710,1	1839,5
Enfriamiento	55,7	45,1

Fuente: Elaboración propia

Análisis de Ciclo de vida del edificio de ladrillo.

En esta sección se van a mostrar los datos necesarios para elaborar el ACV del edificio de ladrillo, de la cuna a la tumba. Para ello, se ha tenido en cuenta el proceso de extracción de materias primas necesarias para la elaboración de 1 kg de ladrillo, el transporte hasta la fábrica de ladrillos, el agua necesaria para su elaboración, así como la energía, electricidad y combustible consumido.

En el cuadro 3 se muestran los datos de cantidades y tipos de materiales empleados para realizar el análisis de inventario en el programa SimaPro para el proceso de obtención del ladrillo. Seguidamente se muestran los datos necesarios para el transporte de los ladrillos hasta el emplazamiento final del edificio, el proceso de construcción, el tiempo de uso del edificio (50 años) y su fin de vida, considerando el proceso de desmantelamiento y vertedero final.

En el cuadro 4 se muestran los datos de las etapas y procesos empleados para realizar el ACV en el programa SimaPro para el proceso de fabricación del edificio de ladrillo, la etapa de uso y mantenimiento (50 años) y su fin de vida (demolición y vertedero). Para ello, se ha considerado la cantidad de total de ladrillo necesaria para la construcción del edificio, así como el cemento necesario, la energía, la electricidad y el combustible consumido.

Cuadro 3. Análisis de inventario para el proceso de obtención del ladrillo.

Ladrillo de Arcilla				
Nº	Material	Base de Datos Ecoinvent v3.8	Valor	Unidad
1	Ladrillo	Clay brick {RER} production APOS, U	1	kg
Entradas Conocida desde la natualeza (Recursos)				
2	Agua	Water, well, RER	2,0E-4	m ³
Entradas Conocida desde la Tecnosfera (Materiales/Combustibles)				
3	Arcilla	Clay {CH} market for clay APOS, U	1,17	kg
4	Petróleo Liger	Light fuel oil {RER} market group for APOS, U	0,005	kg
5	Aceite Lubricante	Lubricating oil {RER} market for lubricating oil APOS, U	1,32E-5	kg
6	Gas Natural	Natural gas, high pressure {Europe without Switzerland} market group for APOS, U	0,03	m ³
Entradas Conocida desde la Tecnosfera (Electricidad/Calor)				
7	Diesel	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	0,03	MJ
8	Electricidad	Electricity, medium voltage {RER} market group for APOS, U	0,04	kWh
Emisiones al Aire				
9	Benceno	Benzene	2,96E-6	kg
10	CO ₂	Carbon Dioxide, fossil	0,18	kg
11	CO	Carbon monoxide, fossil	0,0004	kg
12	CH ₂ O	Formaldehyde	1,64E-5	kg
13	HCL	Hydrogen chloride	1,22E-5	kg
14	HF	Hydrogen fluoride	1,06E-5	kg
15	NO _x	Nitrogen oxides	0,0003	kg
16	NMVOC	NMVOC, non-methane volatile organic compounds	7,63E-5	kg
17	Material particulado	Particulates, < 2.5 um	1,4E-5	kg
18	Material particulado	Particulates, > 10 um	4,7E-6	kg
19	C ₆ H ₆ O	Phenol	1,3E-7	kg

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 4. ACV del edificio de ladrillo.

Etapas del ACV del edificio de ladrillo				
Nº	Datos: Base de Datos Ecoinvent		Valor	Unidad
1. Construcción Ladrillo Convencional.				
1	Materiales	Clay Brick {RoW} production APOS, U.	24300	Kg
2	/Ensamblajes	Cement mortar {RoW} production APOS, U.	1291	Kg
3	Procesos	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 {RoW} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 APOS, U	1093531	KgKm
4		Transport, freight, conveyor belt {GLO} transport, freight, conveyor belt APOS, U	60	KgKm
2. Uso / Operación (50 años)				
5	Procesos	Cooling energy {RoW} from natural gas, at cogen unit with absorption chiller 100kW APOS, U	331	GJ
6		Heat, central or small-scale, other than natural gas {RoW} operation, solar collector system, evacuated tube collector, one-family house, for combined system APOS, U	81	GJ
3. Desmontaje				
7	Procesos	Transport, freight, conveyor belt {GLO} transport, freight, conveyor belt APOS, U	60	KgKm
4. Fin de Vida				
8	Procesos	Fin de vida (Clay Brick)	24300	Kg
Residuos				
9	Proceso	Inert waste, for final disposal {RoW} treatment of inert waste, inert material landfill APOS, U	24300	Kg
ACV del Edificio con Ladrillo Cerámico				
10		1. Construcción.	1	P
11	Materiales/Ensamblajes	2. Uso / Operación (50 años)	1	P
12		3. Desmontaje	1	P
13		4. Fin de Vida	1	p

Fuente: Elaboración propia

Análisis de Ciclo de Vida del edificio de paja.

En esta sección se muestran los datos necesarios para elaborar el ACV del edificio de paja, de la cuna a la tumba. Para ello, se ha tenido en cuenta el proceso de recolección de 1 kg de paja procedente de residuos agrícolas y ganaderos, su empaquetado y prensado para formar las balas de paja, así como la energía, electricidad y combustible consumido.

En el cuadro 5 se muestran los datos de cantidades y tipos de materiales empleados para realizar el análisis de inventario en el programa SimaPro para el proceso de obtención de las balas de paja.

Cuadro 5. Análisis de inventario para el proceso de obtención de balas de paja.

Balas de Paja				
Nº	Material	Base de Datos Ecoinvent v3.8	Valor	Unidad
1	Paja	Straw {RoW} wheat production APOS, U (Modificado)	1	kg
Entradas conocidas desde la Naturaleza (Recursos)				
2	Dióxido de Carbono, en aire.	Carbon Dioxide, in air	0,076	Kg
3	Energía	Energy, gross calorific value, inn biomass	0,81	MJ
Entradas Conocida desde la Tecnosfera (Materiales/Combustibles)				
3	Diesel	Diesel {GLO} market group for APOS, U (Modificado)	0,32/10 = 0,032	kg
4	Transporte	Transport, tractor and tráiler, agricultural {CH} market for transport and tráiler, agricultural APOS, U.	8,32E-5	tkm
Entradas Conocida desde la Tecnosfera (Electricidad/Calor)				
5	Electricidad	Electricity, medium voltage {GLO} market group for APOS, U	0,256	kWh
6	Diesel	Diesel, burned in agricultural machinery {GLO} diesel, burned in agricultural machinery APOS, U (Modificado)	0,92	MJ
Emisiones al Aire				
7	CO ₂	Carbon dioxide, fossil (Modificado)	0,084	kg
8	N ₂ O	Dinitrogen monoxide	4,9E-5	kg
9	NO	Nitrogen Oxides	1,02E-5	kg
10	Agua	Water/m ³	0,013	m ³

Fuente: Elaboración propia

Seguidamente se muestran los datos necesarios para el transporte de las balas de paja hasta el emplazamiento final del edificio, el proceso de construcción, el tiempo de uso del edificio (50 años) y su fin de vida. En este caso no se considera la generación de residuos ya que irían destinados a reutilización.

En el cuadro 6 se muestran los datos de las etapas y procesos empleados para realizar el ACV en el programa SimaPro para el proceso de fabricación del edificio de paja, la etapa de uso y mantenimiento (50 años) y su fin de vida (reutilización de residuos). Se ha considera la cantidad de paja total necesaria para la construcción del edificio, así como la estructura de madera empleadas para vigas y ventanas.

Cuadro 6. ACV del edificio de paja.

Etapas para el análisis del ACV de la Edificación con Balas de Paja				
Nº	Datos: Base de Datos Ecoinvent		Valor	Unidad
1. Construcción Fardos de Paja.				
1	Materiales /Ensamblajes	Straw {RoW} wheat production APOS, U (Modificado)	2777	Kg
2		Structural timber {RoW} structural timber production APOS, U	694	Kg
3	Procesos	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro4 {RoW} market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 APOS, U	124975	KgKm
4		Transport, freight, conveyor belt {GLO} transport, freight, conveyor belt APOS, U	60	KgKm
3	Procesos	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro4 {RoW} market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 APOS, U	124975	KgKm
4		Transport, freight, conveyor belt {GLO} transport, freight, conveyor belt APOS, U	60	KgKm
2. Uso / Operación (50 años)				
5	Procesos	Cooling energy {RoW} from natural gas, at cogen unit with absorption chiller 100kW APOS, U	10,03	GJ
6		Heat, central or small-scale, other than natural gas {RoW} operation, solar collector system, evacuated tube collector, one-family house, for combined system APOS, U	308	GJ
3. Desmontaje				
7	Procesos	Transport, freight, conveyor belt {GLO} transport, freight, conveyor belt APOS, U	60	KgKm
4. Fin de Vida				
8	Procesos	Fin de vida (Straw Bale)	2777	Kg
9		Fin de vida (Wood)	694	Kg
ACV del Edificio con Fardos de Paja				
11	Materiales/Ensamblajes	1. Construcción Fardos de Paja	1	P
12		2. Uso / Operación (50 años)	1	P
13		3. Desmontaje	1	P
14		4. Fin de Vida	1	p

Fuente: Elaboración propia

Evaluación de impactos ambientales.

La evaluación de los impactos ambientales tiene como objetivo vincular los impactos ambientales producidos durante todas las etapas del ciclo de vida de los edificios, mediante el empleo de factores de caracterización (Koura, 2020). En este estudio se ha empleado la metodología “CML-IA baseline” debido a que este método es uno de los más empleados (Christoforou, 2016). CML-IA es la metodología empleada por el Centro de Estudios Medioambientales de la Universidad de Leiden y considera las siguientes categorías de impacto expresadas en términos de emisiones al medio ambiente:

- Potencial de agotamiento abiótico (PAA).
- Potencial de agotamiento abiótico de combustibles fósiles (PAACF).
- Potencial de calentamiento Global (100 años) (GWP)
- Agotamiento de la capa de ozono (ACO).
- Potencial de toxicidad humana (PTH).
- Ecotoxicidad acuática en agua dulce (EAAD).
- Ecotoxicidad marina acuática (EMA).
- Potencial de Ecotoxicidad Terrestre (PET).
- Oxidación fotoquímica (OF).
- Acidificación (A).
- Eutrofización (E).

RESULTADOS

En esta sección se muestran los resultados obtenidos para la evaluación de análisis de impactos ambientales de ambos edificios en cada una de las etapas del ciclo de vida del edificio, desde la etapa de extracción de materias primas hasta la etapa de fin de vida, demolición del edificio y disposición final de los materiales.

En el Cuadro 7 se muestran los datos experimentales obtenidos para las diferentes categorías de impacto para el edificio de ladrillo. Se tienen en cuenta las diferentes etapas del ciclo de vida del edificio por separado: la etapa de construcción que hace referencia a la extracción de materias primas, fabricación del ladrillo y construcción del edificio; la etapa de uso del edificio (50 años); el desensamblaje del edificio y el fin de vida, que hace referencia al traslado de los residuos y su depósito en vertedero.

Cuadro 7. Impactos ambientales del ACV del edificio de ladrillo.

Nº	Categoría impacto	Unidad	Total	Construcción	Uso	Desmontaje	Fin de vida
1	PAA	kg Sbeq	0,38	0,01	0,37	1,11E-08	0,0006
2	PAACF	MJ	3,7E+05	5,21E+04	3,04E+05	0,1	6,02E+03
3	PCG	kg CO ₂ eq	2,9E+04	5,91E+03	2,26E+04	0,008	296
4	ACO	kg CFCEq	0,002	0,0004	0,00164	2,5E-10	6,99E-05
5	PTH	kg 1,4-DBeq	2,04E+04	1,80E+03	1,85E+04	0,003	81,3
6	EAAD	kg 1,4-DBeq	1,31E+04	826	1,22E+04	0,003	51,5
7	EMA	kg 1,4-DBeq	3,23E+07	1,20E+07	2,02E+07	12,5	1,06E+05
8	PET	kg 1,4-DBeq	42,1	3,37	38,5	1,65E-05	0,25
9	OF	kg C ₂ H ₄ eq	4,69	0,9	3,7	1,41E-06	0,06
10	A	kg SO ₂ eq	68,2	13,3	53	3,49E-05	1,96
11	E	kg PO ₄ eq	20,8	3,4	16,9	1,52E-05	0,44

Fuente: Elaboración propia

Así mismo, en el Cuadro 8 se muestran los datos experimentales obtenidos para las diferentes categorías de impacto para el edificio de paja. Como en el caso anterior, se tienen en cuenta las diferentes etapas del ciclo de vida del edificio por separado: la etapa de construcción que hace referencia al proceso de recolección y producción de los fardos de paja y construcción del edificio; la etapa de uso del edificio (50 años), el desmontaje y el fin de vida. En este caso se considera que los residuos de paja y de madera son reutilizados.

Cuadro 8. Impactos ambientales del ACV del edificio de paja.

Nº	Categoría impacto	Unidad	Total	Construcción	Uso	Desmontaje	Fin de vida
1	PAA	kg Sbeq	0,52	0,083	0,004	1,11E-08	-0,005
2	PAACF	MJ	5,07E+04	1,71E+04	5,09E+04	0,1	-1,73E+04
3	PCG	kg CO ₂ eq	4,46E+03	1,39E+03	4,47E+03	0,008	-1,40E+03
4	ACO	kg CFCEq	0,00026	0,00014	0,0003	2,5E-10	-0,0001
5	PTH	kg 1,4-DBeq	2,3E+04	1,04E+03	2,3E+04	0,003	-530
6	EAAD	kg 1,4-DBeq	1,3E+04	880	1,2E+04	0,0034	-452
7	EMA	kg 1,4-DBeq	1,8E+07	1,9E+06	1,7E+07	12,5	-1,3E+06
8	PET	kg 1,4-DBeq	30,6	3,4	29,7	1,65E-05	-2,6
9	OF	kg C ₂ H ₄ eq	1,5	0,4	1,5	1,4E-06	-0,4
10	A	kg SO ₂ eq	31,3	10,4	32,2	3,5E-05	-11,2
11	E	kg PO ₄ eq	12,2	2,4	11,8	1,5E-05	-2,07

Fuente: Elaboración propia

DISCUSIÓN

A continuación, en la Figura 2 se realiza un análisis comparativo de todos los impactos ambientales generados durante todo el ciclo de vida del edificio de ladrillo y el edificio de paja. Se han tenido en cuenta todas las categorías de impacto incluidas en la metodología CML-IA. Como se pueden ver en las gráficas de la Figura 2 y en los cuadros 7 y 8, las categorías de impacto que presentan valores más elevados son el potencial de agotamiento abiótico de combustibles fósiles (PAACF), GWP, el potencial de toxicidad humana (PTH), ecotoxicidad acuática en agua dulce (EAAD) y ecotoxicidad marina acuática (EMA). Estos resultados estarían en concordancia con los resultados mostrados por Christoforou *et al.* (2016) en su estudio sobre el ACV de la producción de ladrillo para construcción en diferentes escenarios.

En todas las categorías de impacto se puede apreciar que las etapas del ciclo de vida que más afectan al medio ambiente son la construcción del edificio y el tiempo de uso. En la primera etapa, el proceso de extracción de materias primas, el transporte, la fabricación de los elementos de construcción y el proceso de construcción del edificio son procesos que generan impactos negativos sobre el medio ambiente. En la etapa de uso del edificio también se producen importantes impactos negativos sobre el medio ambiente debido al consumo de energía necesario para aclimatar el edificio. En el caso del edificio de paja, la etapa de fin de vida genera impactos positivos sobre el medio ambiente debido al proceso de reutilización de los materiales.

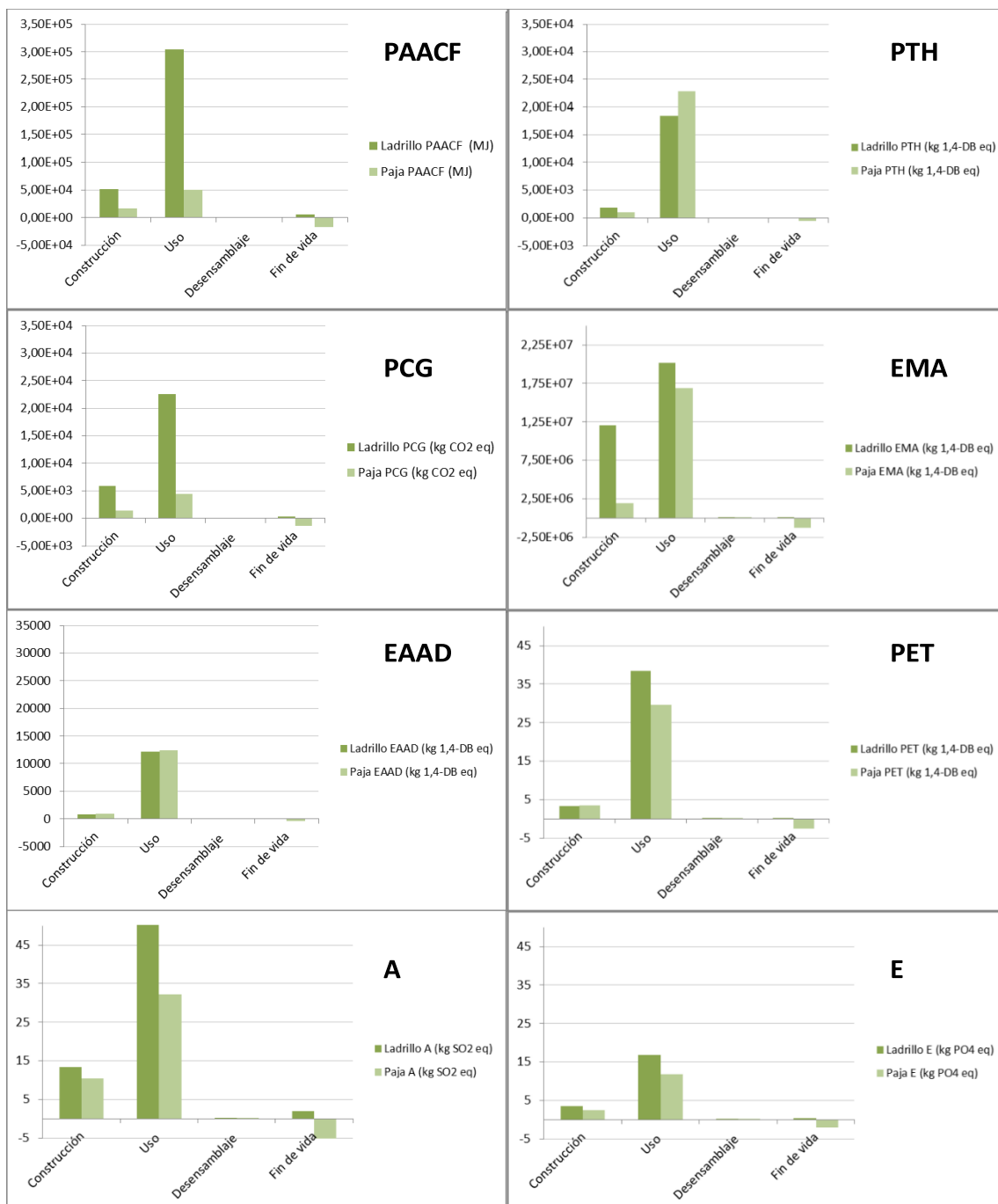


Figura 2. Comparativa de Impactos ambientales del edificio de ladrillo y el edificio de paja en cada etapa del ciclo de vida (Elaboración propia)

En relación al potencial de agotamiento abiótico de combustibles fósiles (PAACF), las etapas que más impactan son la construcción del edificio y el uso. Estos resultados son los esperados debido a que este impacto ambiental se debe al consumo de combustibles fósiles y sus emisiones. El edificio de ladrillo afecta más a este impacto debido a que la etapa de fabricación del ladrillo requiere el consumo de combustibles fósiles para la extracción de las materias. Además, el

proceso de fabricación del ladrillo requiere un importante consumo de energía en la etapa de cocción del ladrillo (Christoforou *et al.*, 2016; Koroneos y Dompros, 2007).

En relación al GWP, en la etapa de construcción es el edificio de ladrillo el que genera mayor impacto debido al proceso de extracción de materias primas, el transporte, la fabricación de los elementos de construcción y el proceso de construcción del edificio, ya que son procesos que consumen combustibles fósiles y emiten gases contaminantes a la atmósfera. En el caso del edificio de paja, esta contiene grandes cantidades de CO₂ capturado del aire, lo que ayuda a reducir las emisiones de CO₂ en la atmósfera. En la etapa de uso del edificio, las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera son menores en el edificio de paja. Esto se debe a que las excelentes propiedades aislantes de la paja hacen que el consumo de energía para aclimatar el edificio sean menores, como se puede observar en los datos mostrados en el Cuadro 2. Además, otros autores también han reportado evidencias de ahorro de energía durante la fase de uso de edificios de paja de hasta 400% (Yin, Lawrence y Maskell, 2018).

Los resultados relacionados con la categoría de impacto del potencial de toxicidad (PTH, EAAD y EMA) medidos como kg de 1,4-diclorobenzol equivalente, se deben a la emisiones a la atmósfera por el consumo de combustibles fósiles y energía en los procesos de extracción de materias primas, el transporte, la fabricación de los elementos de construcción, el proceso de construcción del edificio y el tiempo de uso. Durante el último siglo los sistemas de producción de cultivos han evolucionado rápidamente lo que ha resultado en un aumento significativo de los rendimientos de producción, pero también han creado efectos secundarios ambientales indeseables, como la degradación y erosión del suelo, la contaminación por fertilizantes químicos y agroquímicos y una pérdida de biodiversidad (IndexMundi, 2019).

CONCLUSIONES

El objetivo principal de este estudio es examinar los impactos ambientales generados por dos edificios de las mismas características, un edificio de ladrillo y el mismo edificio de paja. Ambos ACV han considerado todas las etapas del edificio desde “la cuna a la tumba”.

En base a los resultados mostrados anteriormente, se demuestra que el empleo de fardos de paja como material de construcción disminuye los impactos negativos sobre el medio ambiente en el proceso de fabricación de los materiales de construcción, permite reutilizar un residuo agrícola y además la paja contiene grandes cantidades de CO₂ capturado del aire, lo que ayuda a reducir las emisiones de CO₂ en la atmósfera. Por otro lado, las buenas características aislantes de los fardos de paja permiten disminuir el consumo energético durante la etapa de uso del edificio, por lo que disminuyen a su vez los impactos negativos sobre el medio ambiente, derivados del consumo de energía para climatización. Este estudio demuestra las ventajas sobre el medio ambiente del empleo de fardos de paja como material de construcción.

BIBLIOGRAFIA

- [1]. Organización de las Naciones Unidas [ONU] (2021). Global Status Report for Buildings and onstruction. <https://cutt.ly/nBJeUow>
- [2]. European Commission Agency (2019). New rules for greener and smarter buildings will increase quality of life for all Europeans. <https://cutt.ly/WBJeqEz>
- [3]. European Commission Agency (2018). EU Construction and Demolition Waste Protocol and Guidelines. <https://cutt.ly/lBJw3jS>
- [4]. Sartori, I. & Hestnes, A.G. (2007). Energy use in the life cycle of conventional and low-energybuildings: A review article. *Energy and Buildings*. Volume 39, Issue 3, Pages 249-257
- [5]. Zabalza I. (2012). *Repensar edificios mediante el análisis de ciclo de vida. Repensar Canfranc. Taller de rehabilitación urbana y paisaje*. ISBN 978-84-15770-42-8, pp. 70-81
- [6]. Christoforou, E., kiKylili, A., Fokaides, P.A. & Ioannou, I. (2016). Cradle to site Life Cycle Assessment (LCA) of adobe bricks. *Journal of Cleaner Production* 112(1), 20 443-452
- [7]. Muñoz, P., Morales, P., Letelier, V., Muñoz, L. & Mora, D. (2017). Implications of Life Cycle EnergyAssessment of a new school building, regarding the nearly Zero Energy Buildings targets in EU. *A case of Study*, 32, 142-152
- [8]. Pinto, J., Paivaa, A., Varumd, N., Costa, A., Cruza, D., Pereira, S., Fernandes, L., Tavares, P. & Agarwal, J. (2011). Corn's cob as a potential ecological thermal insulationmaterial. *Energy and Buildings*, 43, 1985–1990.
- [9]. Ashour, T., Georg, H. & Wu, W. (2011). Performance of straw bale wall: a case of study. *Energyand Buildings*, 43, 1960–1967.
- [10]. González, A.D. (2014). Energy and carbon embodied in straw and clay wall blocksproducedlocally in the Andean Patagonia. *Energy and Buildings*, 70, 15–22
- [11]. Martínez, C. (2019). *Estudio y Aplicaciones de las Construcciones con Fardos de Paja*. TrabajoFin de Grado, Universidad de Valladolid, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Valladolid.
- [12]. IndexMundi. (2019). Cereal production (metric tons) Country Ranking. <https://cutt.ly/tBH6xWj>
- [13]. Bozsaky (2019). Natura-based thermal isulation materials from renewable resoruces. Astate of the art Review. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 27, 52-59.

- [14]. Simapro (2022). LCA software for informed change-makers. <https://cutt.ly/VBH6WXX>
- [15]. Ecoinvent (2022). Ecoinvent database. <https://ecoinvent.org/>
- [16]. Koura, J., Manneh, R., Belarbi, R., El Khoury, V. & El Bachawate, M. (2020). Comparative cradle to grave environmental life cycle assessment of traditional and extensive vegetative roofs: an application for the Japanese context. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 25, 423-442.
- [17]. Christoforou, E., Kylili, A., Fokaides, P.A. & Ioannou, I. (2016). Cradle to site Life Cycle Assessment [LCA] of adobe bricks. *Journal of Cleaner Production*, 112(1), 443-452.
- [18]. Lawrence, M. (2015). Reducing the Environmental Impact of Construction by Using Renewable Materials. *Journal of Renewable Materials*, 3(3), 63-174
- [19]. Loza Miralles, J.A., Hermoso Orzáez, M.J., Martínez García, C. & Rojas Sola, I. (2018). Comparative Study on the Environmental Impact of Traditional Clay Bricks Mixed with Organic Waste Using Life Cycle Analysis. *Sustainability*, 10. 2917.
- [20]. Koroneos C. & Dompros A. (2007). Environmental assessment of brick production in Greece. *Building and Environment*, 42(5), 2114-2123.
- [21]. Enescu, D. (2017). A review of thermal comfort models and indicators for indoor environments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 1353-1379.
- [22]. Jorquera, H., Villalobos, A.M. & Schauer, J.J. (2021). Wood burning pollution in Chile: A tale of two mid-size cities. *Atmospheric Pollution Research*, 12, 4.50-59.
- [23]. CML Department of Industrial Ecology. (2016). CML-IA Characterisation Factors. Universiteit Leiden. <https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors>
- [24]. Yin X., Lawrence, M. & Maskell, D. (2018). Straw bale construction in northern China Analysis of existing practices and recommendations for future development. *Journal of Building Engineering*, 18, 408-417.