

Huella Ambiental de Producto de una vivienda unifamiliar aislada

AGOSTO, 2020

Ignacio Lechón
Yolanda Lechón

ÁBATON

EDICIÓN: AGOSTO / 2020
EDITA: ÁBATON
ESPAÑA

AUTORES
Ignacio Lechón (Arquitecto)
Yolanda Lechón (Ingeniera)

COLABORADORES ÁBATON
Elia Peroni (Arquitecto)
Ángel Laguna Amorich (Jefe de Obra)
Guillermo Santos García (Arquitecto)
Blanca Marias (Arquitecta)
Andrea Taragan (Estudiante de Arquitectura)

REVISIÓN CIENTÍFICA
Dña. Cristina de la Rúa Lope. Investigadora post
doctoral en la Universidad Técnica de Munich

© 2020 ÁBATON. Reservados todos los
derechos. A los efectos del art. 32 del texto
refundido de la Ley de Propiedad Intelectual
aprobado por el Real Decreto Legislativo
1/1996, de 12 de abril, ÁBATON, se opone
expresamentea cualquier utilización con fines
comerciales del contenido de esta publicación
sin su expresa autorización, lo cual incluye
especialmente cualquier reproducción,
modificación, registro, copia, explotación,
distribución, comunicación, transmisión,
envío, reutilización, publicación, tratamiento
o cualquier otra utilización total o parcial en
cualquier modo, medio o formato de esta
publicación.

Cualquier forma de reproducción, distribución,
comunicación pública o transformación de
esta obra solo puede ser realizada con la
autorización de ÁBATON, salvo excepción
prevista por la Ley.

Huella Ambiental de Producto de una vivienda unifamiliar aislada

OFICINA & SHOWROOM
C/ Ciudad Real, 28
28 223, Pozuelo de Alarcón
Madrid, España

+34 91 352 16 16
info@abaton.es

INSTAGRAM
@abaton_arc

FACEBOOK
@abaton_arch

IGNACIO LECHÓN
Arquitecto

Autores

Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid E.T.S.A.M. (1991). Socio. Arquitecto del Estudio ÁBATON Arquitectura desde 1998.

Comenzó su andadura profesional colaborando con varios estudios de arquitectura, entre ellos merece la pena destacar la colaboración con Ricardo Lajara, con quien llegó a asociarse durante algunos años en los primeros 90, de esa época destaca el proyecto de ampliación de las oficinas centrales del INEM en Madrid que diseña y dirige.

Desde 1998 y hasta 2016 colabora con la administración, concretamente con el ayuntamiento de San Martín de la Vega, dirigiendo el área de urbanismo del

ayuntamiento y coordinando la implantación del parque Warner y la redacción de su Plan General de urbanismo.

En 1998 funda ÁBATON Arquitectura junto con Camino Alonso (Arquitecto) y Carlos Alonso (Ingeniero Industrial). Desde entonces, a los nuevos materiales se fueron añadiendo nuevas soluciones que se incorporaban a los proyectos. Desde la fundación de ABATON, Ignacio Lechón ha sido el responsable último de todos los proyectos del estudio.

Desde el año 2017 Ignacio Lechón cuenta con la acreditación *Passive Designer* del *Passive House Institute*, respondiendo a una necesidad de formación en un nuevo paradigma de arquitectura fundado en la eficiencia energética, el respeto al medio y el consumo casi nulo.

YOLANDA LECHÓN
Doctora Ingeniera
Agrónoma

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos (E.T.S.I.A.) de la Universidad Politécnica de Madrid (1996).

Jefa de la Unidad de Análisis de Sistemas Energéticos del Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (C.I.E.M.A.T.) del Ministerio de Ciencia e Innovación desde 2013.

Sus principales actividades de investigación se han centrado en la evaluación económica de los costes y beneficios externos, o externalidades, asociados con la producción y el consumo de energía, la evaluación de la sostenibilidad de tecnologías energéticas y procesos desde una perspectiva del ciclo de vida, utilizando las herramientas de Análisis de Ciclo de Vida (A.C.V.), los modelos Input Output extendidos y la modelización

de sistemas energéticos a través de modelos tecno económicos de optimización de equilibrio parcial.

Ha participado en más de 40 proyectos de investigación, tanto de la Comisión Europea como nacionales, además de colaborar como evaluadora en varios programas nacionales e internacionales de I+D. También ha participado como coautora en más de 100 artículos y capítulos de libros y ha realizado más de 90 contribuciones en conferencias y talleres.

Nace como estudio de Arquitectura en 1998 de la mano de Camino Alonso, Ignacio Lechón y Carlos Alonso. A lo largo de su trayectoria se ha ido desarrollando un lenguaje atemporal de la forma en el que se incorporan detalles y soluciones específicas de acuerdo a cada cliente o cada lugar concreto.

Los principios que rigen la arquitectura de ÁBATON se basan en la potencialización de la iluminación natural, en el contacto con el exterior, la minización de espacios residuales y la conciencia ecológica y sostenible. Pronto ÁBATON desarrolla su propia empresa

de construcción con el objetivo de elevar la calidad de la arquitectura cuidando hasta el último detalle. Esto también posibilita desarrollar sus propias soluciones constructivas a través de la constante innovación y búsqueda de nuevas soluciones, además de contribuir a la disminución del impacto económico.

El cuidado del detalle se lleva hasta la fase final de la obra. Es en ese momento en el que la colaboración con BATAVIA como socio en interiorismo resulta esencial para obtener como resultado lo que hoy se reconoce como una "casa ÁBATON".

ÁBATON está concienciado con la huella que la construcción deja sobre el entorno y su objetivo es minimizarla en la medida de lo posible. Llevamos años aplicando criterios bioclimáticos.

La conciencia medioambiental de ÁBATON tiene como objetivo la minimización de la huella ambiental mediante el uso de múltiples técnicas que se basan en el uso de materiales de bajo impacto ambiental, ecológicos, altamente reciclables y de coste ajustado. Por otro lado, se trata de que las aguas pluviales reviertan siempre al territorio para mantener la

humedad natural del área donde se edifica. La aplicación de criterios bioclimáticos a todos los proyectos, con el objetivo de que sean eficientes energéticamente a corto y largo plazo, caracteriza todos los proyectos del estudio.





Autores
ÁBATON

SOBRE EL ENCARGO

- PROYECTO
- A. Datos Generales
 - B. Concepto Proyectual
 - C. Sistema Construtivo: CLT
 - Sistema CLT en el Proyecto

1. RESUMEN EJECUTIVO

2. INTRODUCCIÓN

3. DEFINICIÓN DE OBJETIVOS DEL ESTUDIO DE HUELLA AMBIENTAL

4. DEFINICIÓN DEL ALCANCE DEL ESTUDIO DE HUELLA AMBIENTAL

5. COMPILACIÓN Y REGISTRO DEL PERFIL DE USO DE LOS RECURSOS Y DE EMISIONES
- 5.1. Fase de construcción
 - 5.2. Fase de uso
 - 5.3. Fase de fin de vida

6. EVALUACIÓN DE IMPACTO DE LA HUELLA AMBIENTAL DE LA VIVIENDA
- 6.1. Impactos de la etapa de construcción del edificio
 - 6.2. Impactos de la etapa de uso del edificio
 - 6.3. Impactos de la etapa de mantenimiento del edificio
 - 6.4. Impactos de la etapa de fin de vida del edificio
 - 6.5. Impactos totales

7. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA HUELLA AMBIENTAL DE LA VIVIENDA
- 7.1. Identificación de puntos críticos
 - 7.2. Análisis de sensibilidad
 - 7.3. Comparación con otros estudios
 - 7.4. Conclusiones, limitaciones y recomendaciones

GLOSARIO

REFERENCIAS



SOBRE EL ENCARGO

En octubre de 2016 la familia MR contacta con el estudio ÁBATON. Conocen y siguen el trabajo del estudio y su constructora desde hace años y han decidido empezar la búsqueda de una parcela en la que poder promover el desarrollo de su vivienda.

Están interesados en despejar dudas sobre el proceso, ser acompañados para la realización de un presupuesto estimado global de la operación y contar con la asesoría en la elección de parcela. Comparten con el estudio ÁBATON preocupación por una alta eficiencia energética en la edificación y exponen su programa de necesidades.

El estudio les acompaña en los meses siguientes en la selección del terreno para asegurar una parcela con todo el potencial (las mejores condiciones de soleamiento, vistas, etc.) en la que desarrollar el futuro proyecto. Tras la visita a varias opciones, seleccionan el terreno en el que finalmente se ha desarrollado el proyecto unos meses después de la primera visita.

La disposición espacial del programa se materializó de forma muy compacta de modo que el factor de forma, la relación entre volumen y superficie envolvente, fue óptimo.

La combinación del sistema de aislamiento exterior mediante poliestireno (EPS), grandes espesores de aislamiento en cubierta, el uso de paneles CLT y cámaras interiores aisladas permitió tener un buen valor de transmitancia general del edificio.

En cuanto a la orientación, se buscó la apertura de grandes ventanales al sur para captación térmica en invierno y para conectar la vivienda con el jardín. Estos ventanales se protegieron con voladizos para limitar la incidencia solar y limitar el sobrecalentamiento en verano. En el resto de las fachadas se limitó el tamaño de los huecos especialmente en la fachada oeste para controlar el sobrecalentamiento.

Todas las estancias disponen de ventilación cruzada de modo que pueda renovarse el aire con facilidad y refrescar las estancias con eficacia. La vivienda no cuenta con un sistema de ventilación con recuperador de calor.

En la ejecución del acristalamiento se sellaron las juntas entre la carpintería y el CLT, y el SATE se solapó sobre las carpinterías para evitar las infiltraciones. No se practicó ningún test de hermeticidad.

El resultado es una vivienda con un estándar constructivo muy exigente, con una certificación energética A, que sigue las directrices conceptuales del estándar passivhaus, cumpliendo las exigencias del PHPP, pero que no implementó sistemas de evaluación ni certificación.



PROYECTO

El siguiente estudio analiza la Huella Ambiental de Producto (HAP) de una edificación proyectada y construida por el estudio de arquitectura ÁBATON.

Se trata de una vivienda unifamiliar aislada de 247 m² cuya vida útil se estima en 50 años. La peculiaridad de esta vivienda radica en el sistema constructivo utilizado: paneles contralaminados CLT. Para dicho estudio de HAP se ha considerado su análisis desde su construcción hasta el fin de su vida útil y, por lo tanto, su demolición, además de tener en cuenta el intervalo de 50 años de uso y mantenimiento.

A continuación se detalla el proyecto, de forma previa a exponer detalladamente el estudio realizado en base a este.

A. Datos Generales

Ubicación	Las Rozas, Madrid (España).
Año	2016
Tipología	Vivienda unifamiliar aislada c/ piscina
Sup. Parcela	1.962,36 m²
Sup. Construida	247 m²

B. Concepto Proyectual

El proyecto que se presenta está diseñado teniendo en cuenta los condicionantes de la parcela y las características y necesidades de sus futuros habitantes.

La arquitectura huye de artificios externos y es proyectada desde el interior, generando espacios comunicados en los que la luz natural y las vistas fluyen acorde a los parámetros de diseño habituales de ÁBATON. De esta forma, la vivienda se ubica y se orienta en la parcela buscando las mejores vistas y las mejores condiciones de iluminación natural hacia el interior. La búsqueda de la mayor eficiencia energética posible se ve favorecida también por la ubicación en la parcela.



EMPLAZAMIENTO EN PARCELA



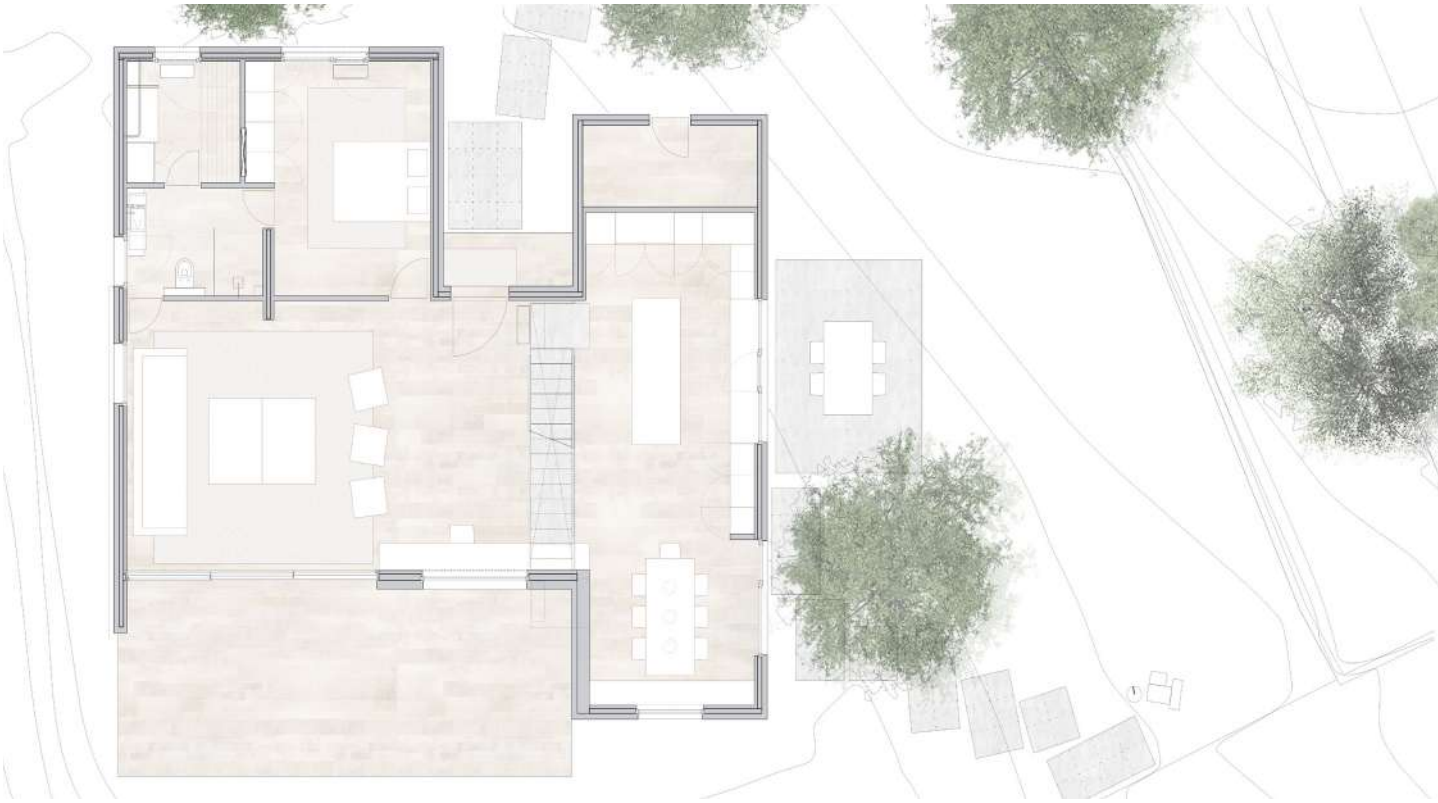
La vivienda, que se diseña como un único espacio integrador y ampliamente comunicado se divide en dos plantas. La planta baja se diseña como un único espacio que integra en dos niveles distintos la entrada, salón, cuarto trastero, porche, jardín y aseo y en un segundo nivel una amplia cocina con comedor incorporado y salida directa al jardín de la zona este.

En la planta alta se encuentran, alrededor de un espacio de usos múltiples, el dormitorio principal, a través del cual se accede a un amplio vestidor bañado por luz natural y a un baño completo con vistas a las copas de la zona de arbolado del noreste de la parcela; el dormitorio secundario cuenta con una terraza independiente a la sierra norte y con acceso directo a un baño.

En el proyecto se trata de asegurar la mayor sensación de amplitud espacial vinculando interior y exterior, donde la intervención proyectada es mínima.



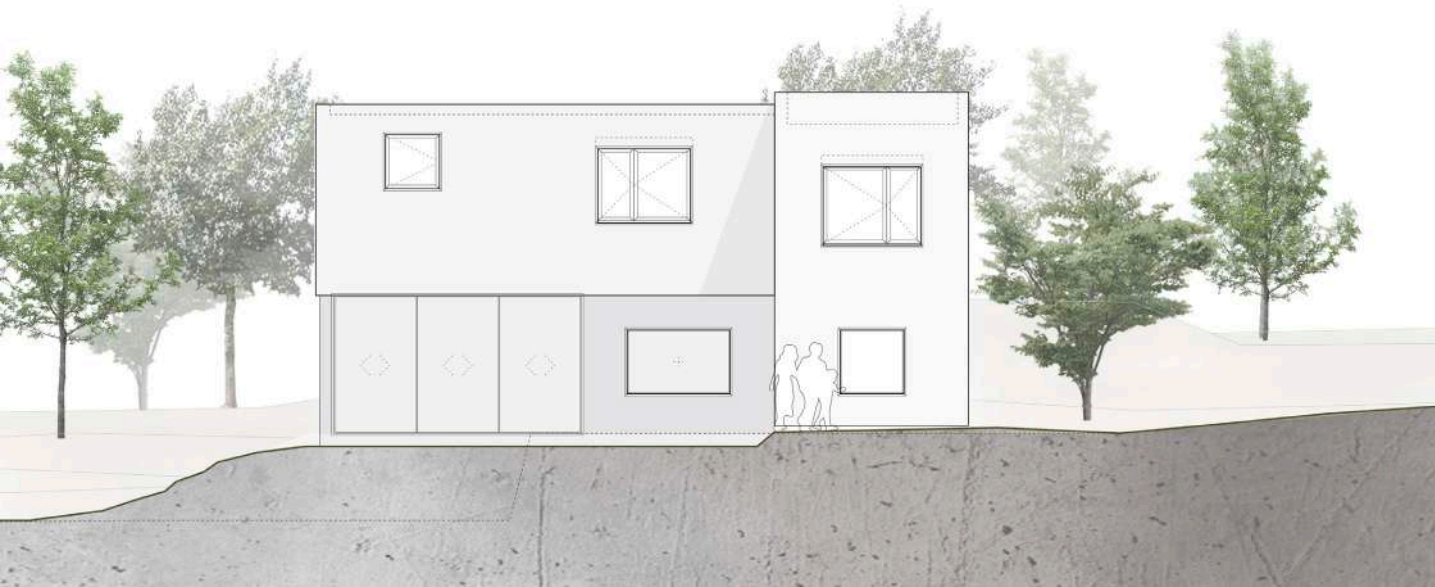
PLANTA ALTA



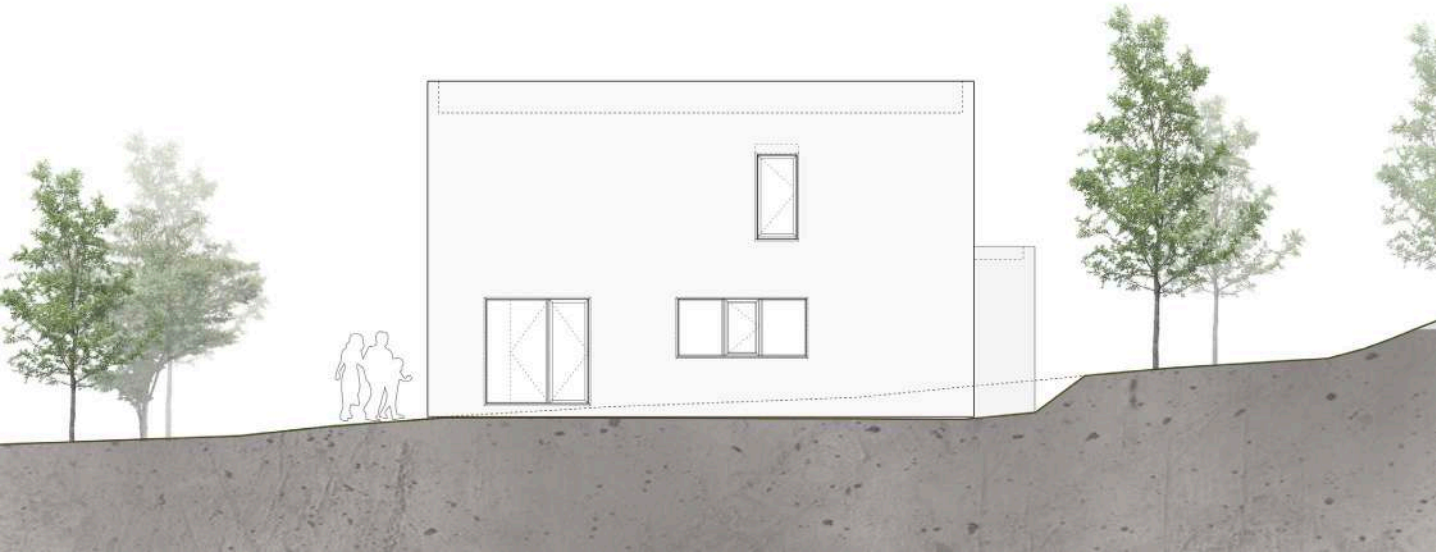
PLANTA BAJA



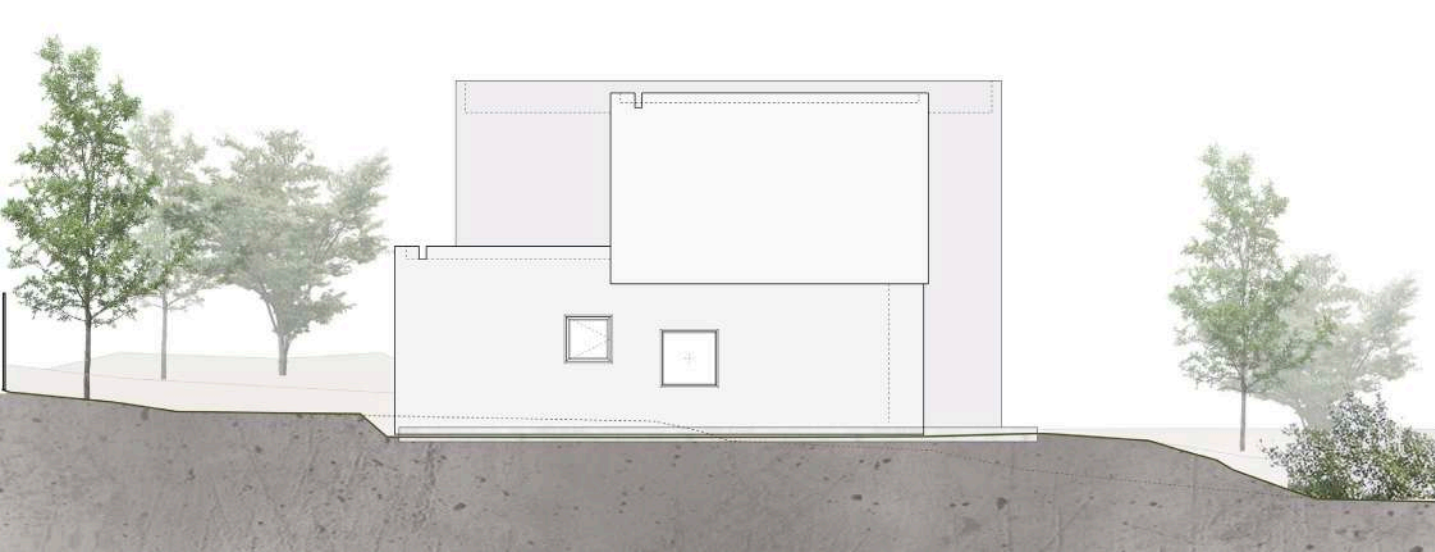
ALZADO NORTE



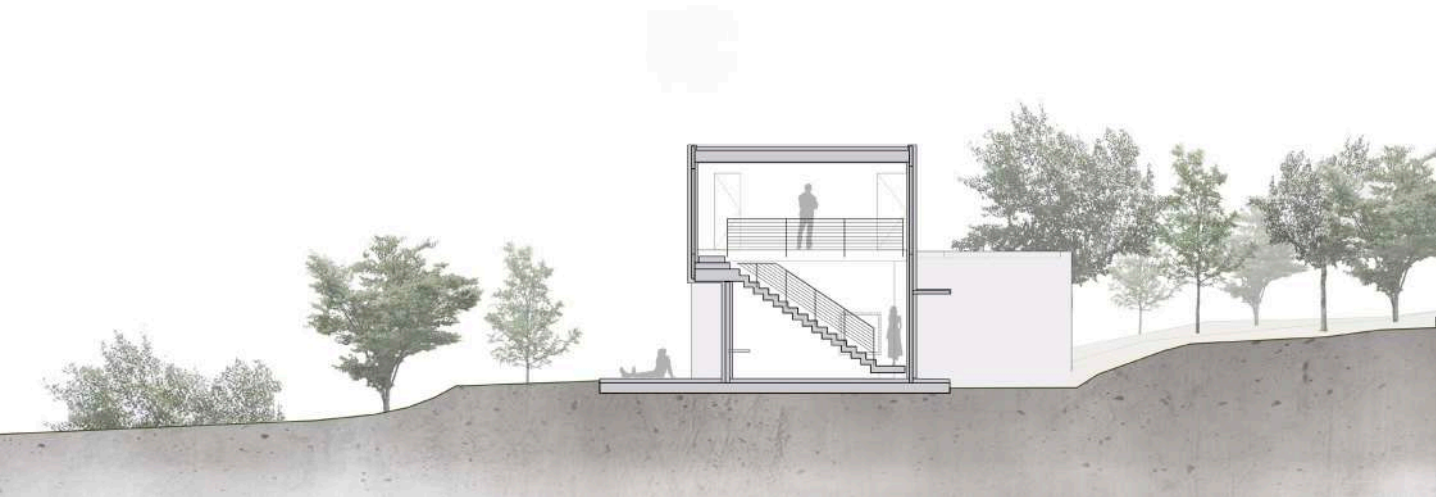
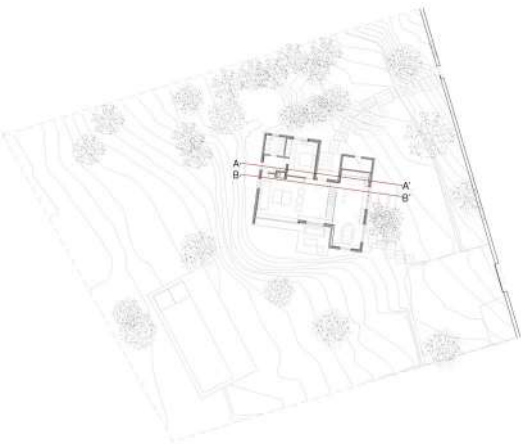
ALZADO SUR



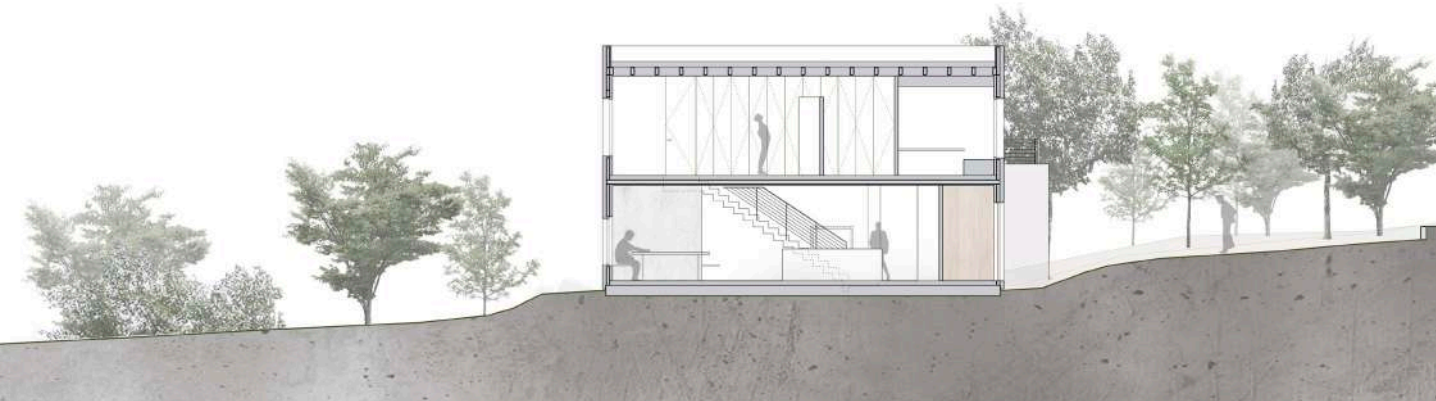
ALZADO ESTE



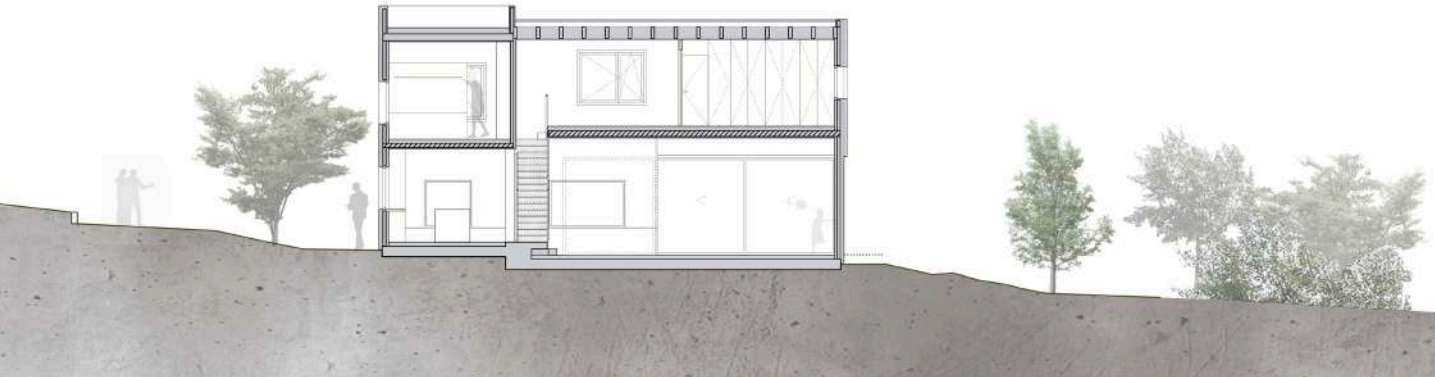
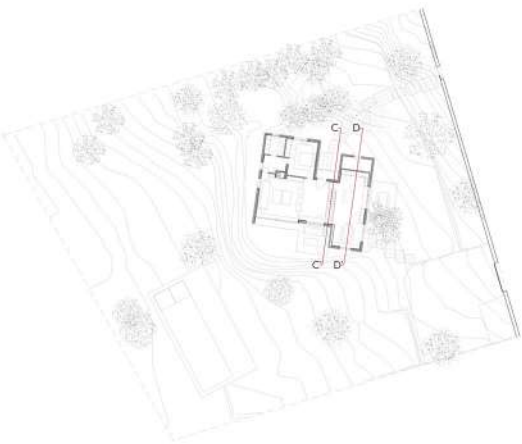
ALZADO OESTE



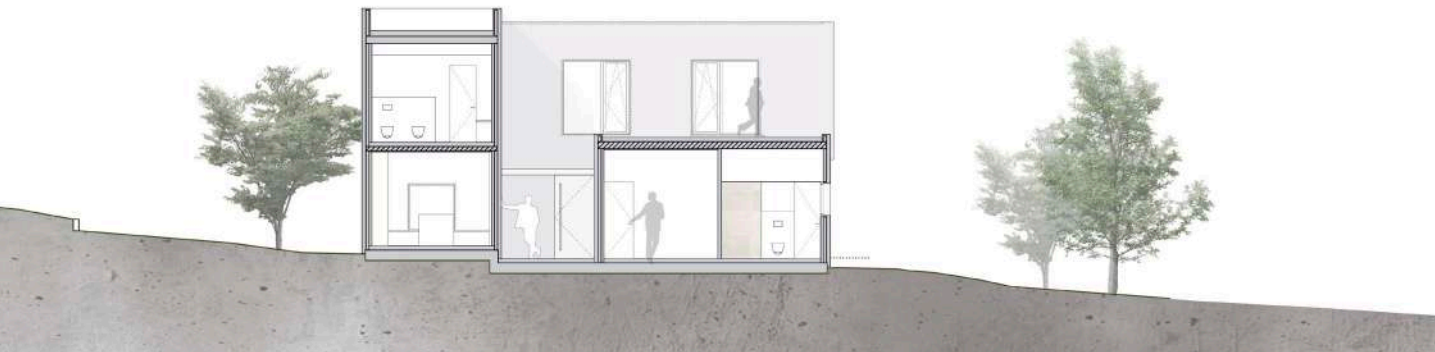
SECCIÓN AA'



SECCIÓN BB'



SECCIÓN CC'



SECCIÓN DD'

C. Sistema Constructivo: CLT

El sistema constructivo utilizado en el proyecto se presenta como una solución a la crisis medioambiental en la que el sector de la construcción mucho tiene que ver. Esto se debe a que el sistema de madera contralaminada o Cross Laminated Timber (CLT) se basa en un recurso renovable, la madera. A todo ello se le suma la capacidad que tiene la madera de absorber el dióxido de carbono y que, por lo tanto, hacen de esta materia prima un sumidero natural de CO₂.

Este sistema consiste en paneles de madera compuestos por tableros monocapa de madera aserrada y encolada dispuestos de manera entrecruzada, es decir, orientados de manera perpendicular con respecto a la capa anterior. Este conjunto, posteriormente, es sometido a un proceso de prensado para consolidar la unión. El número de capas que se disponen en un panel CLT ha de ser impar, por lo que podrán estar formados por 3, 5 o 7 capas. A partir de cinco capas, el CLT puede tener también capas centrales (transversales) sin encolar por los cantos.

La disposición de las capas de manera perpendicular unas respecto a otras, favorece la rigidez estructural del panel en ambas direcciones, además de mejorar las prestaciones de resistencia a tracción y compresión. Por otro lado, el rendimiento estructural también se ve favorecido por la disminución de los factores de dilatación y contracción.

Algunas de las ventajas que presenta el sistema constructivo CLT son:

- Bajo impacto ambiental
- Sin consumo de agua
- Sin generación de residuos
- Sensillez constructiva
- Rapidez y precisión de montaje
- Reducción de mano de obra
- Mayor control de calidad y de limpieza
- Alta resistencia estructural
- Versatilidad en el diseño
- Alta capacidad aislante
- Valor añadido estético
- Sismorresistente

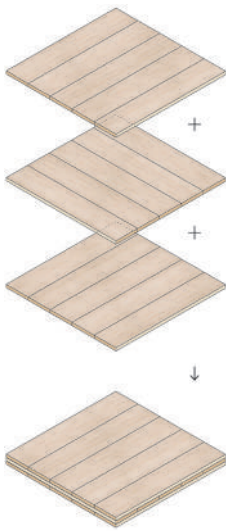
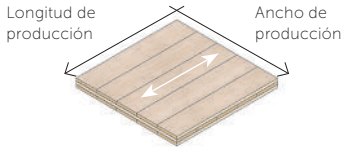


FIG 1. Esquema explicativo de la formación de los paneles CLT.

TABLEROS C

Las fibras de las capas exteriores van siempre en sentido perpendicular al ancho de producción.



TABLEROS L

Las fibras de las capas exteriores van siempre en sentido paralelo al ancho de producción.

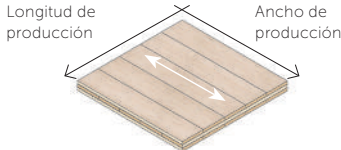


FIG 2. Esquemas de los tipos estándar de estructuras CLT: tableros C y tableros L.

La madera se extrae principalmente del abeto, pino y alerce. La tala de éstos se produce de manera sostenible en bosques controlados para tal efecto.

Las dimensiones de los paneles CLT varían en función del fabricante y de las condiciones de transporte. Sin embargo, se pueden encontrar las siguientes dimensiones máximas de producción en el mercado:

- Ancho: 2,95 metros
- Largo: 16,00 metros
- Grosor: 400 mm. El grosor de cada capa dependerá del fabricante.

Por lo tanto, este sistema constructivo se basa en un conjunto de piezas prefabricadas cuya unión se realiza en obra. Se distinguen dos tipos estándar de estructuras de CLT (Ver FIG. 2).

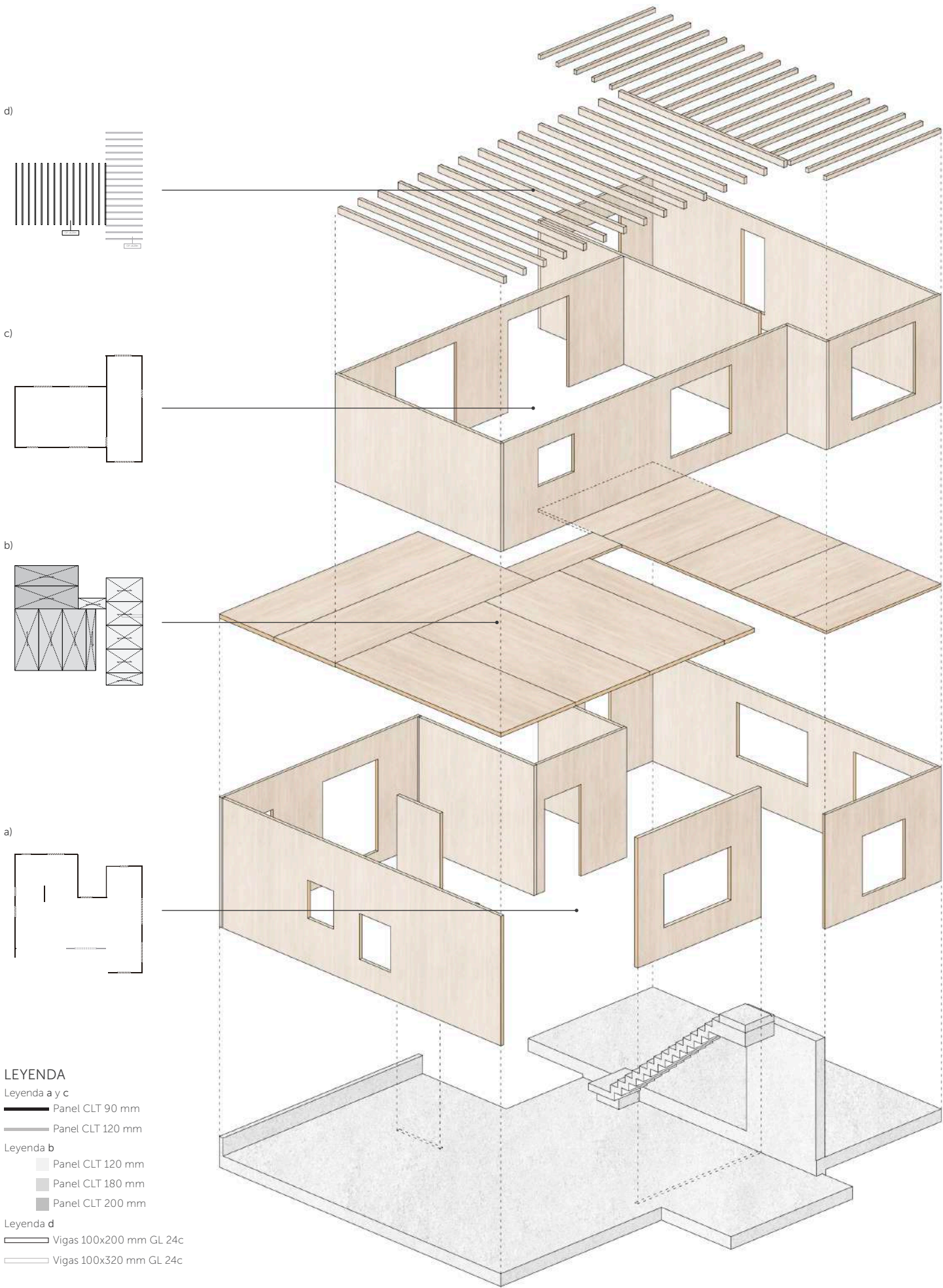
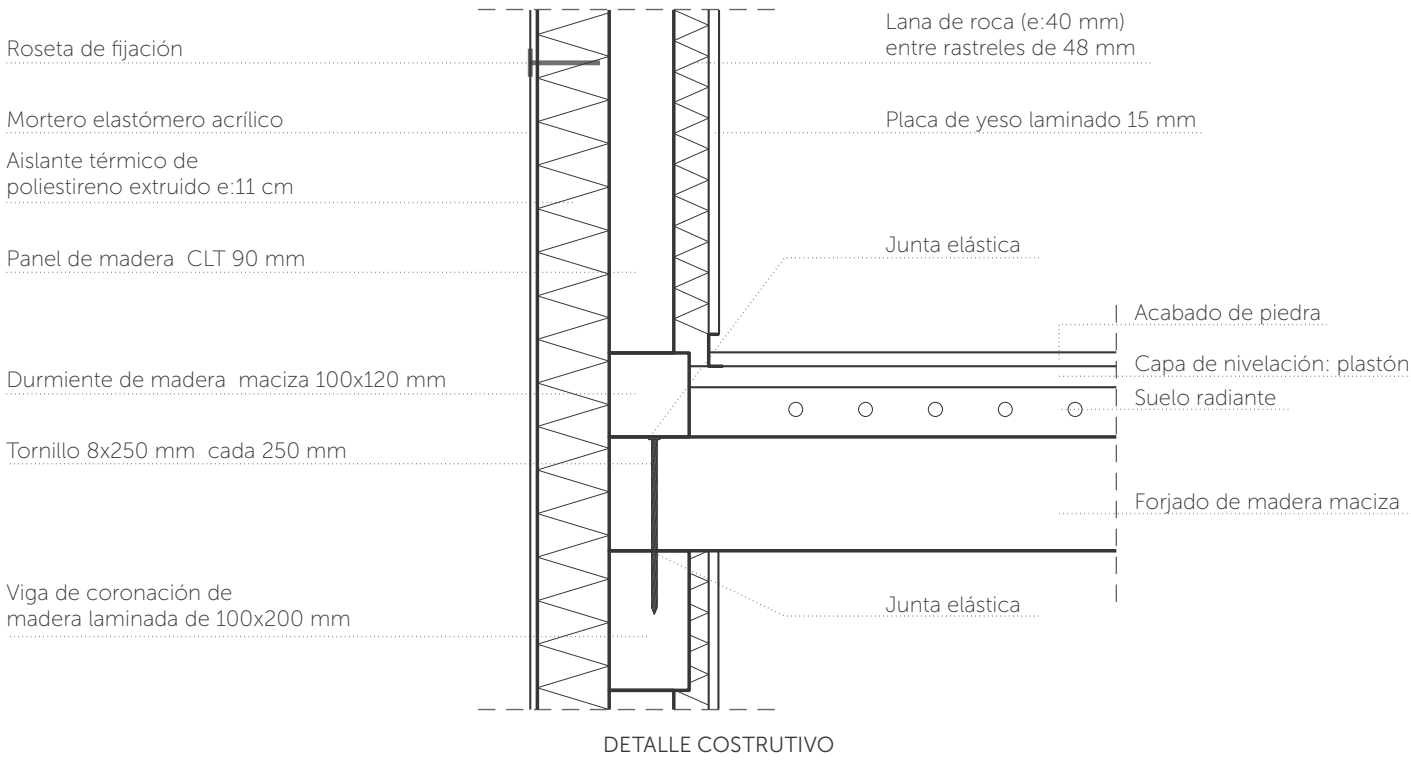
En la etapa de producción los paneles CLT se generan previniendo las aberturas, juntas, perforaciones, canalizaciones específicas y necesarias para su posterior ensamblado *in situ*. De esta forma, el sistema constructivo se caracteriza por estar formado por unas piezas independientes hechas a medida que se ensamblan de una forma específica en obra.

Esto supone un mayor trabajo previo en la etapa de diseño y proyecto con el objetivo de definir de manera precisa la situación de todos los huecos, la manera de ensamblarse, el tipo de juntas, etc. Sin embargo, el tiempo de montaje y, por lo tanto, la fase de construcción se ven considerablemente disminuidos.

Los paneles CLT se pueden usar de manera íntegra en todo el proyecto, tanto en los forjados y cubiertas como en los elementos portantes verticales exteriores y particiones interiores. Esto se ve facilitado por los sencillos sistemas de unión entre paneles. Normalmente, para los elementos verticales se utilizan paneles de 3 o 5 capas, mientras que para los forjados se usan los paneles de 5 o 7 capas.

Sistema CLT en el Proyecto

Como se ha mencionado anteriormente, el sistema estructural del proyecto objeto del presente estudio se basa en el uso de paneles CLT. A continuación se especifica cómo se ha desarrollado el proyecto con dicho sistema, mostrando el replanteo de los paneles CLT en planta baja y alta para la formación de muros (FIG 3. (a) y (c)) y la disposición de los paneles para la formación del forjado de la planta alta (Figura 03 (b)). Este entramado se apoya sobre una losa de hormigón. Por otro lado, también se expone la sección constructiva que define el proyecto.



1. RESUMEN EJECUTIVO

El presente documento calcula la Huella Ambiental de Producto (HAP) de una vivienda unifamiliar aislada siguiendo para ello las recomendaciones al respecto de la Comisión Europea (Diario Oficial de la Unión Europea, 2013).

La unidad de análisis es una vivienda unifamiliar aislada de 247 m². La vida útil de la vivienda se estima en 50 años. El flujo de referencia¹ elegido para este estudio de HAP es la vivienda completa desde su construcción, pasando por el uso de la misma durante 50 años hasta su demolición final. Las categorías de impacto² consideradas en este estudio de HAP son las recomendadas para la última actualización del método de HAP (Fazio et al., 2018).

Los límites del sistema³ definen las partes del ciclo de vida de la vivienda y los procesos asociados que pertenecen al sistema analizado (es decir, que son necesarios para realizar sus funciones). El límite del sistema y los procesos incluidos en el análisis se detallan en la FIG. 4.

¹Flujo de referencia. Medida de las salidas de los procesos, en un sistema del producto determinado, requerida para cumplir la función expresada mediante la unidad de análisis.

²Categoría de impacto. Clase de uso de recursos o de impacto ambiental a que corresponden los datos del perfil de uso de los recursos y de emisiones. Medida de las salidas de los procesos, en un sistema del producto determinado, requerida para cumplir la función expresada mediante la unidad de análisis.

³Límites del sistema. Definición de los aspectos incluidos o excluidos del estudio.



FIG 4. Definición de los límites del sistema y procesos primarios y secundarios

Se han analizado, además de los impactos sobre el cambio climático, un total de 15 impactos ambientales adicionales de los cuales los más importantes son:

- Toxicidad humana – efectos no cancerígenos;
- Toxicidad humana – efectos cancerígenos;
- Eutrofización⁴ agua dulce;
- Uso del suelo;
- Consumo de agua;
- Uso de energía.

Los resultados obtenidos en la evaluación de impacto son los siguientes:

TABLA 1.

IMPACTO	INDICADOR ⁸	CONSTRUCCIÓN	USO DE 50AÑOS	MANTENIMIENTO
Cambio climático	kg CO ₂ eq	96.366,83	298.508,57	28.642,60
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC-11 eq	0,05	0,15	0,04
Radiaciones ionizantes ⁴	kBq U-235 eq	8.839,24	184.148,56	2.195,39
Formación de ozono troposférico ⁵	kg NMVOC eq	8.839,24	1.168,77	103,11
Enfermedades respiratorias	Incidencia de enfermedad	0,005	0,01	0,002
Toxicidad humana - efectos no cancerígenos	CTUh	0,02	0,04	0,004
Toxicidad humana - efectos cancerígenos	CTUh	0,003	0,005	0,003
Acidificación terrestre	mol H + eq	502,86	2.820,36	299,30
Eutrofización ⁶ agua dulce	kg P eq	31,08	137,78	11,63
Eutrofización marina	kg N eq	101,19	423,03	42,31
Eutrofización terrestre	mol N eq	1145,49	4.686,67	355,60
Ecotoxicidad ⁷ agua dulce	CTUe	79.970,03	131.430,37	110.579,92
Uso del suelo	Pt	278.827,68	2.276.767,59	944.844,99
Consumo de agua	m3 depriv.	9.031.444,89	664.496,11	510.546,78
Uso de energía	MJ	1.053.221,33	6.315.422,57	335.218,16
Uso de recursos minerales y metálicos	kg Sb eq	0,61	0,57	0,18

⁴**Radiaciones ionizantes.** Categoría de impacto de HA correspondiente a los efectos nocivos sobre la salud humana debidos a emisiones radiactivas.

⁵**Ozono troposférico.** Ozono que se encuentra en la troposfera (capa atmosférica entre el suelo y a unos 10 km de altura). Puede encontrarse en concentraciones superiores a las habituales en la atmósfera y, en este caso, puede ser considerado un contaminante atmosférico.

⁶**Eutrofización.** Proceso por el que los nutrientes (principalmente nitrógeno y fósforo) procedentes de vertidos de aguas usadas y de tierras agrícolas fertilizadas aceleran el crecimiento de las algas y demás

vegetación en el agua. La degradación de la materia orgánica consume el oxígeno, lo que provoca una deficiencia de esta sustancia y, en algunos casos, la muerte de los peces.

⁷**Ecotoxicidad.** Categoría de impacto ambiental relativa a los impactos tóxicos que afectan a un ecosistema, que son nocivos para distintas especies y que cambian la estructura y función del ecosistema.

⁸**Indicador de categoría de impacto de huella ambiental.** Representación cuantificable de una categoría de impacto de HA.

kg CO₂ eq. Kilogramo equivalente de dióxido de carbono. Utilizado como indicador del nivel de emisión de Gases de Efecto Invernadero, según el

Modelo base de 100 años del Panel Internacional de Cambio Climático (IPCC).

kg CFC-11 eq. Kilogramo equivalente de triclorofluorometano (CFC-11), que es un clorofluorocarbono, un compuesto químico que al liberarse a la atmósfera contribuye al adelgazamiento de la capa de ozono. Por este motivo el kg CFC-11 eq. es utilizado como indicador del agotamiento de la capa de ozono. Los clorofluorocarbonos se usan principalmente en aereosoles y sistemas de refrigeración.

kBq U-235 eq. Kilobequerelio equivalente de Uranio (U) 235, siendo el bequerelio la unidad que mide la actividad radiactiva (1 Bq es equivalente a una desintegración radiactiva por segundo). Utilizado como

indicador de radiaciones ionizantes.

CTUh. Unidad tóxica comparativa para humanos, unidad que se caracteriza por proporcionar el aumento estimado en morbilidad en la población humana total por unidad de masa de un contaminante emitido. Por lo tanto, CTUh por kg emitido = casos de enfermedad por kg emitido, según el *Modelo USEtox*. Unidad utilizada como indicador de la toxicidad humana, diferenciando entre aquellas de efecto cancerígeno y las que no.

mol H + eq. Mol equivalente de ion hidrógeno H⁺, siendo el mol la unidad que mide la cantidad de una determinada sustancia, en este caso, el hidrógeno, para utilizarse como indicador del impacto de acidifi-

cación terrestre. Los iones de hidrógeno se liberan cuando los gases de emisiones de NOx, NH₃ y SOx se mineralizan, contribuyendo a la acidificación del suelo y del agua.

kg P eq. Kilogramo equivalente de fósforo (P). Utilizado como indicador de la eutrofización del agua dulce.

kg N eq. Kilogramo equivalente de nitrógeno (N). Utilizado como indicador de la eutrofización de agua marina.

mol N eq. Mol equivalente de nitrógeno (N). Utilizado como indicador de la eutrofización terrestre.

CTUe. Unidad tóxica comparativa para los ecosistemas, unidad que se caracteriza por propor-

cionar una estimación de la fracción de especies potencialmente afectadas (PAF) integrada en el tiempo y el volumen por unidad de masa de un químico emitido, por lo tanto, CTUe por kg emitido = [PAF m³ por kg emitido, según el *Modelo USEtox*. Unidad utilizada como indicador de la ecotoxicidad.

kg Sb eq. Kilogramo equivalente de antimonio (Sb). Utilizado como indicador de uso de recursos minerales y metálicos.

En la etapa de construcción del edificio, los impactos sobre el cambio climático se han cuantificado en 390 kg CO eq/m². Adicionalmente, la estructura de madera secuestra un total de -142 kg CO₂ eq/m². Los aspectos identificados como más críticos en los resultados de la HAP del edificio analizado son los siguientes:

- Cimentaciones y estructuras;
- Estructura de madera;
- Carpintería de PV C y cerrajería;
- Revestimientos e impermeabilizaciones;
- Solados y alicatados;
- Electricidad;
- Pintura.

La etapa de uso del edificio está dominada por los consumos en calefacción del edificio seguido de los consumos en refrigeración y en Agua Caliente Sanitaria (ACS). Los consumos en iluminación suponen un 6-7% de los impactos. Todos los consumos energéticos son eléctricos y los impactos están muy influenciados por la estructura del mix de generación⁹ nacional. En cuanto al mantenimiento del edificio destacan los impactos debidos a la renovación de la pintura y el cambio de ventanas.

La etapa de fin de vida produce tanto impactos positivos como negativos. En conjunto, esta etapa ofrece resultados negativos (efectos positivos sobre el medio ambiente) en las categorías de: cambio climático, radiaciones ionizantes, toxicidad humana, eutrofización de agua dulce, ecotoxicidad de agua dulce, consumo de agua y uso de energía.

En general, el uso del edificio sigue siendo la etapa que tiene una mayor contribución a los impactos con excepción de las categorías de impacto de agotamiento de la capa de ozono, enfermedades respiratorias, toxicidad humana (cáncer), consumo de agua y uso de recursos minerales y metálicos en los que la etapa de construcción de edificio tiene un mayor peso.

A medida que se produzca la descarbonización esperada en el mix eléctrico del país, los impactos de la etapa de uso irán perdiendo relevancia frente a la etapa de construcción en la mayoría de los impactos.

Del análisis de sensibilidad¹⁰ se ha obtenido que el aumento del espesor del aislamiento incrementa los impactos asociados a la construcción del edificio, pero disminuye los consumos energéticos en el uso del edificio y, por tanto, los impactos asociados. En conjunto, el impacto global sobre el cambio climático se reduce en un 7%. El cambio de carpinterías por carpinterías de aluminio o madera no produce un impacto apreciable en los resultados. En cuanto al uso de un sistema de ventilación mecánica, éste trae como consecuencia una reducción importante del consumo energético en el uso del edificio con una reducción del impacto global sobre el cambio climático de un 10%. Si se combina el efecto del aumento del espesor del aislamiento

⁹Mix de generación. Conjunto de tecnologías de generación de electricidad y el del sistema en su conjunto.

¹⁰Análisis de sensibilidad. Procedimientos sistemáticos para la estimación de los efectos de las opciones elegidas en relación con los métodos y datos sobre los resultados del estudio de HAP.

con la instalación de un sistema de ventilación mecánica el efecto en los resultados es de una reducción de un 15% de los impactos sobre el cambio climático. Finalmente la instalación de paneles fotovoltaicos, si bien incrementa de forma importante los impactos de la construcción del edificio, reduce de forma muy significativa los impactos en el uso del edificio. En conjunto la reducción de los impactos globales es de un 39%.

Los resultados normalizados y ponderados permiten obtener un valor único de huella ambiental de cada uno de los escenarios. Estos resultados mostraron que los impactos en la construcción del edificio son de mayor relevancia que los impactos de la fase de uso debido al papel muy relevante de los impactos sobre la escasez de agua.

Los resultados también mostraron que las inversiones en medidas de aislamiento, así como el uso de sistemas de ventilación forzada reducen la huella ambiental de forma muy significativa. Los mejores resultados se obtuvieron con el uso de paneles fotovoltaicos que demostraron reducir significativamente la huella ambiental. Se identificaron algunos posibles efectos negativos en algunas categorías de impacto en el caso del incremento del espesor de aislamiento y el uso de paneles fotovoltaicos.

En base a los resultados obtenidos en este estudio las recomendaciones para disminuir la Huella Ambiental de esta vivienda serían las siguientes:

- Minimizar el uso de hormigón;
- Reducir las distancias de transporte;
- Aumentar los espesores del sistema de aislamiento térmico;
- Instalar ventilación mecánica;
- Instalar paneles fotovoltaicos;
- Minimizar el uso de pinturas/usar productos menos contaminantes;
- Separar las corrientes de residuos susceptibles de ser recicladas y llevarlas a reciclaje.

2. INTRODUCCIÓN

El presente documento calcula la Huella Ambiental de Producto (HAP) de una vivienda unifamiliar aislada siguiendo para ello las recomendaciones al respecto de la Comisión Europea (Diario Oficial de la Unión Europea, 2013).

De acuerdo a la definición de estas recomendaciones la Huella Ambiental de los Productos (HAP) es una medida multicriterio del comportamiento ambiental de un bien o servicio a lo largo de su ciclo de vida con el objetivo general de reducir el impacto ambiental de los bienes y servicios involucrados en todas las actividades de la cadena de suministro (de la extracción de las materias primas a la gestión de los residuos finales, pasando por la producción y el uso).

Para la realización este estudio de HAP se han seguido las siguientes fases: la definición de los objetivos, la definición del alcance del estudio, el perfil de uso de los recursos y de emisiones¹¹, la evaluación de impacto de la huella ambiental y la interpretación y la presentación de informes de huella ambiental. El resto del documento describe la realización de dichas fases.

¹¹Perfil de uso de recursos y de emisiones.
Inventario de datos recogidos para representar las entradas y las salidas asociadas con cada fase de la cadena de suministro del producto o proceso que se estudia. La compilación del perfil de uso de recursos y de emisiones se completa cuando hay flujos no elementales, es decir, complejos que se transforman en flujos elementales.

3. DEFINICIÓN DE OBJETIVOS DEL ESTUDIO DE HUELLA AMBIENTAL

El presente estudio de HAP ha sido encargado por la empresa ÁBATON para utilizarse de forma interna. Las razones que justifican la realización del estudio de HAP son las siguientes:

- Determinación de los puntos críticos desde el punto de vista ambiental de la vivienda analizada y los impactos ambientales significativos;
- Determinación de las posibilidades de optimización y reducción de los impactos ambientales producidos por la vivienda;
- Cuantificación de los impactos inevitables producidos con el objetivo de compensarlos en concreto en el caso de la huella de carbono:
- Los destinatarios del estudio son los dueños y personal técnico de la empresa ABATON. Este estudio ha sido sometido a un proceso de revisión externa por un experto independiente.

4. DEFINICIÓN DEL ALCANCE DEL ESTUDIO DE HUELLA AMBIENTAL

4.1. Unidad de Análisis y Flujo de Referencia
La unidad de análisis es una vivienda unifamiliar aislada de 247 m². La vida útil de la vivienda se estima en 50 años.
El flujo de referencia elegido para este estudio de HAP es la vivienda completa desde su construcción, pasando por el uso de la misma durante 50 años hasta su demolición final. Todos los flujos de entrada y salida estarán referidos a este flujo de referencia aunque los resultados finales se expresarán también por m² construido y año para facilitar la comparación con otros estudios de HAP.

4.2. Límites del Sistema
Los límites del sistema definen las partes del ciclo de vida de la vivienda y los procesos asociados que pertenecen al sistema analizado (es decir, que son necesarios para realizar sus funciones). El límite del sistema y los procesos incluidos en el análisis se detallan en la Figura 04. Los procesos incluidos en los límites del sistema se han dividido en procesos primarios (es decir, procesos esenciales del ciclo de vida del producto a cuya información se tiene acceso directo) y procesos secundarios (es decir, procesos del ciclo de vida del producto a cuya información no se tiene acceso directo).

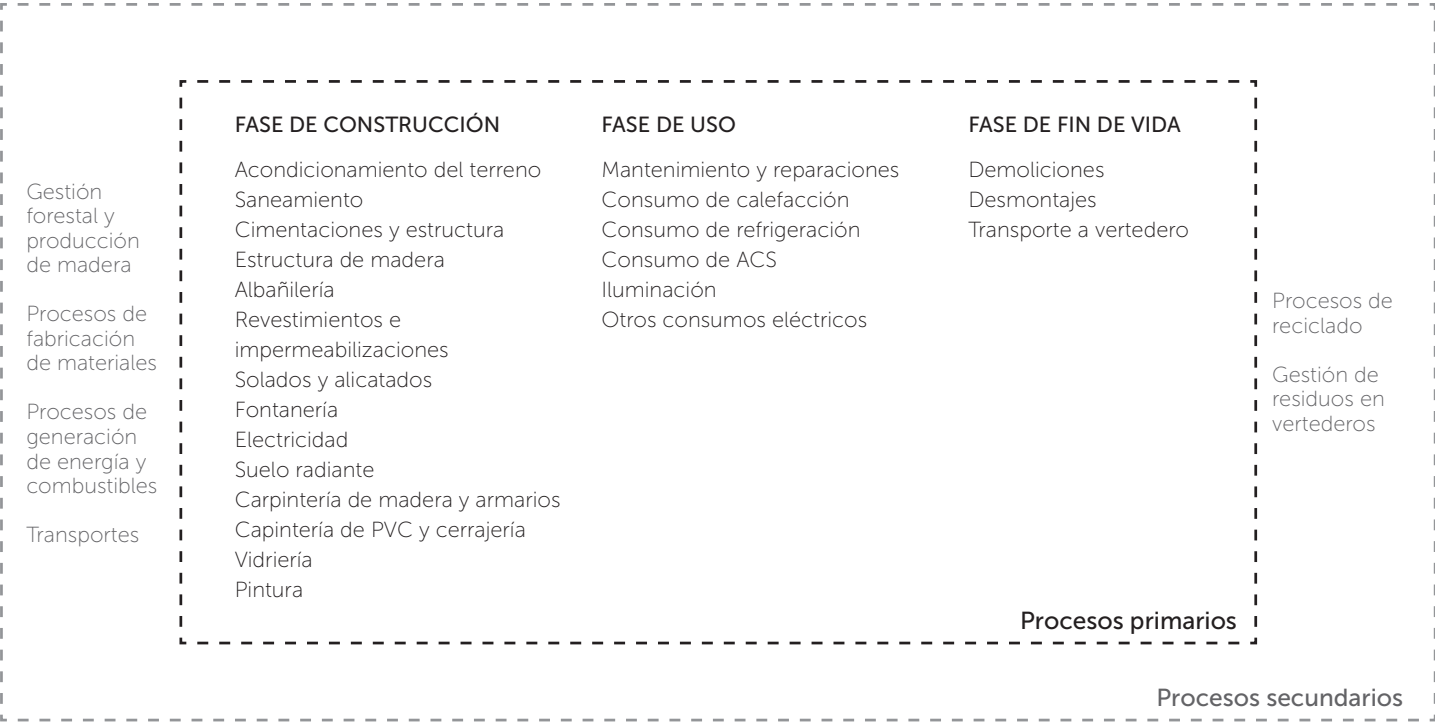


FIG 5. Definición de los límites del sistema y procesos primarios y secundarios

4.3. Selección de las categorías de impacto de la huella ambiental y métodos de evaluación

Las categorías de impacto consideradas en este estudio de HAP son las recomendadas para la última actualización del método de HAP (Fazio et al., 2018).

Las categorías contempladas, el método de evaluación y el indicador para cada categoría se muestra en la Tabla 2.

TABLA 2.

Categoría de Impacto	Método Recomendado	Indicador de categoría de impacto	Fuente
Cambio climático	Modelo base de 100 años del Panel Internacional de Cambio Climático (IPCC)	Kg CO ₂ equiv	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2013
Agotamiento de la capa de ozono	Modelo EDIP basado en los PAO de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) en un plazo de tiempo infinito	kilogramo equivalente de CFC-11	OMM, 1999
Ecotoxicidad para ecosistemas de agua dulce	Modelo USEtox	CTUe (Unidad tóxica comparativa para los ecosistemas)	Rosenbaum et al., 2008
Toxicidad humana – efectos cancerígenos	Modelo USEtox	CTUh (Unidad tóxica comparativa para los ecosistemas)	Rosenbaum et al., 2008
Toxicidad humana – efectos no cancerígenos	Modelo USEtox	CTUh (Unidad tóxica comparativa para los ecosistemas)	Rosenbaum et al., 2008
Partículas/sustancias inorgánicas con efectos respiratorios	Modelo de material particula-dorecomendado por el Programa de las Naciones Unidas para el Ambiente (UNEP)	Incidencia	UNEP (2016)
Radiaciones ionizantes – efectos sobre la salud humana	Modelo de efectos sobre la salud humana	kilogramo equivalente de U 235 (en el aire)	Dreicer et al., 1995
Formación fotoquímica de ozono	Modelo LOTOS-EUROS	kilogramo equivalente de COVNM (*)	Van Zelm et al., 2008, tal como se aplica en ReCiPe
Acidificación	Modelo de acumulación de excedentes	mol equivalente de ion hidrógeno H ⁺	Seppälä et al., 2006; Posch et al., 2008
Eutrofización - terrestre	Modelo de acumulación de excedentes	mol equivalente de nitrógeno (N)	Seppälä et al., 2006; Posch et al., 2008
Eutrofización – acuática- agua dulce	6.232,32	kilogramo equivalente de fósforo (P)	Struijs et al., 2009, tal como se aplica en ReCiPe
Eutrofización – acuática- agua de mar	Modelo EUTREND. Fracción de nutrientes que alcanzan el agua de mar	kilogramo equivalente de nitrógeno (N)	Struijs et al., 2009, tal como se aplica en ReCiPe
Agotamiento de los recursos - agua	Consumo de agua ponderado por el potencial de carencia para los usuarios	kilogramo equivalente de agua	Metodo AWARE (Available WAter Remaining) en UNEP, 2016
Agotamiento de los recursos – minerales y metales	Agotamiento de recursos abióticos	kilogramo equivalente de antimonio (Sb)	CML Guinée et al. (2002) en van Oers et al. (2002)
Agotamiento de los recursos – vectores energéticos	Agotamiento de recursos abióticos – combustibles fósiles	Mega julios (MJ)	CML Guinée et al. (2002) en van Oers et al. (2002)
Transformación de la tierra	Índice de calidad del suelo basado en LANCA (producción biótica, resistencia a la erosión, filtración mecánica y recarga de acuíferos)	Índice agregado de: Kg producción biótica/(m²*a) kg soil/(m²*a) m³ water/ (m2*a) m³ g.water/(m²*a)	Beck et al. 2010 and Bos et al. 2016

5. COMPILACIÓN Y REGISTRO DEL PERFIL DE USO DE LOS RECURSOS Y DE EMISIONES

En esta sección se detalla el cálculo del inventario o perfil de uso de recursos de todas las entradas/salidas de materia/energía y de las emisiones a la atmósfera y vertidos al agua y al suelo de la cadena de suministro del producto, que son la base para la modelización de la HAP.

5.1. Fase de Construcción

5.1.1. Acondicionamiento del Terreno

La selección y cuantificación de los flujos no elementales¹² que entran en la fase de acondicionamiento del terreno se detalla en la siguiente tabla. Los datos han sido recogidos de la memoria de mediciones del proyecto:

TABLA 3. Perfil de uso de recursos en la fase de acondicionamiento del terreno

Flujo no Elemental	Cantidad	Unidad
Utilización de máquina minicargadora en excavación de pozos de cimentación y soleras	342	h
Excavación de tierras en pozos de cimentación, soleras y vaciado general de la edificación	195,41	m³
Relleno de tierras	345,60	m³
Transporte de tierras de relleno (neto)	7990,11	tkm

Para el transporte de las tierras se ha considerado un camión de 12t EURO6 (dataset de Ecoinvent¹³ *Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO6 {RoW}*)| *transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO6 | Alloc Def, U*). Se ha considerado una distancia de transporte de 20 km. y una densidad de las tierras de 1,8 t/m³.

La máquina minicargadora es una New Holand LS 160 con un consumo horario de diésel de 3l/h de trabajo y un consumo de aceite de 0,04 l/h de trabajo. La vida útil de la máquina es de 15.000 h. Con estos datos los consumos de diésel y aceite de la máquina en esta etapa se han estimado en 1.026 l de gasoil y 13,68 l de aceite.

¹²**Flujos no elementales.** Entradas y salidas que no son flujos elementales y que requieren más esfuerzos de modelización para transformarse en flujos elementales.

¹³**Dataset.** Colección de datos habitualmente tabulada. La base de datos Ecoinvent proporciona los dataset de proceso para los productos, teniendo en cuenta el impacto ambiental que suponen.

5.1.2. Saneamientos

La selección y cuantificación de los flujos no elementales¹² que entran en la fase de saneamiento se detalla en la siguiente tabla. Los datos han sido recogidos de la memoria de mediciones del proyecto:

TABLA 4. Perfil de uso de recursos en la fase de saneamiento

Flujo no Elemental	Cantidad	Unidad
Arquetas de registro	13	Kg CO ₂ equiv
Colectores de saneamiento de PVC 200 mm	93,75	m lineales
Tubería de drenaje 125 mm	66	m lineales
Grava de drenaje	42	m ³
Aislamiento e insonorización de bajantes	75	m lineales
Transporte gravas	1218	tkm

Las arquetas de registro tienen unas dimensiones interiores de 51x51x65 cm, están construidas con fábrica de ladrillo perforado tosco de 1/2 pie de espesor, recibido con mortero de cemento M-5, colocado sobre solera de hormigón en masa HM-20/P/40/I de 10 cm de espesor, enfoscada y bruñida por el interior con mortero de cemento M-15 redondeando ángulos, ligeramente armada con mallazo, enfoscada y bruñida por el interior con mortero de cemento M-15, y con tapa y marco de hormigón armado prefabricada. Según los datos de (CYPE Ingenieros, 2019) cada arqueta de este tipo tiene las siguientes cantidades de materiales:

TABLA 5. Perfil de uso de recursos en una arqueta

Flujo no Elemental	Cantidad	Unidad
Hormigón HM-30/B/20/I+Qb, fabricado en central, con cemento SR	0,147	m ³
Ladrillo cerámico perforado (panal), para revestir, 24x11,5x9 cm, según UNE-EN 771-1	56,00	Ud
Agua	0,014	m ³
Mortero industrial para albañilería, de cemento, color gris, categoría M-5 (resistencia a compresión 5 N/mm2), suministrado en sacos, según UNE-EN 998-2	0,035	t
Mortero industrial para albañilería, de cemento, color gris, con aditivo hidrófugo, categoría M-15 (resistencia a compresión 15 N/ mm2), suministrado en sacos, según UNE-EN 998-2	0,045	t
Tapa y marco de hormigón	9	kg

Los datasets utilizados para estos materiales son los siguientes:

TABLA 6. Datasets de materiales utilizados.

Material	Dataset	Cantidad	Unidad
Mortero de cemento M5			
Cemento	Cement, Portland {CH} market for APOS, U	0,14	kg/kg mortero
Arena	Silica sand {GLO} market for APOS, U	0,86	kg/kg mortero
Electricidad	Electricity, medium voltage {ES} market for APOS, U	0,0278	kWh/kg mortero
Mortero de cemento M15			
Cemento	Cement, Portland {CH} market for APOS, U	0,25	kg/kg mortero
Arena	Silica sand {GLO} market for APOS, U	0,75	kg/kg mortero
Electricidad	Electricity, medium voltage {ES} market for APOS, U	0,0278	kWh/kg mortero
Ladrillos	Brick, at plant/RER S		
Agua	Tap water, at user/RER U		
Hormigón	Concrete, normal, at plant (modificado para considerar el mix eléctrico en España en 2018.)		



FIG 6. Arqueta con tapa.

El transporte de los materiales necesarios para construir las 13 arquetas supone un total de 145,9 tkm. Para este transporte se ha considerado un camión de 12 t EURO6 y una distancia de 20km. Los colectores de saneamiento y la tubería de drenaje son de PVC y se han modelizado considerando un plástico de PVC (dataset *Polyvinylidenchloride, granulate {GLO}| market for | Alloc Def, U*) y un proceso adicional de extrusión (*Extrusion, plastic pipes/ES U*). En total el peso de PVC necesario para todas las tuberías es de 273,4 kg. Adicionalmente los colectores de saneamiento descansan sobre una cama de arena de río de 10 cm de espesor y las zanjas se rellenan lateralmente y superiormente hasta 10 cm por encima de la generatriz con la misma arena. La cantidad de arena necesaria se ha estimado en 0,088m³/m lineal con un total de 8,25 m³.

Las tuberías de drenaje van colocadas sobre cama de arena de río de 10 cm de espesor, revestida con geotextil de 125 g/m² y rellenas con grava filtrante 25 cm por encima del tubo. La cantidad de arena necesaria se ha estimado en 0,07 m³/m lineal con un total de 4,62 m³. La cantidad de grava se ha estimado en 0,21 m3/m lineal con un total de 13,86 m³. La cantidad de geotextil se estima en 2,2 m²/m lineal con un total de 145,2 m². La lámina de geotextil es de polipropileno (125 g/m²) y se ha modelizado considerando el plástico (*Polypropylene granulate (PP), production mix, at plant RER*) y un proceso adicional de extrusión (*Extrusion of plastic sheets and thermoforming, inline {ES} | processing | Alloc Def, U*). La cantidad total de PP utilizada en el geotextil es de 18,15 kg.

El aislamiento de las bajantes se realiza con Fonodan BJ que es un producto bicapa formado por una membrana autoadhesiva de alta densidad-espesor 4 mm/ancho 42 cm. Esta membrana es de polietileno de alta densidad y se ha modelizado considerando un plástico de PE (*data set Polyethylene, HDPE, granulate, at plant/ RER U*) y un proceso adicional de extrusión (Extrusion, plastic film/RER U). El peso de PE de alta densidad necesario para todo el aislamiento de bajantes es de 1.4 kg/m lineal con un total de 105 kg.

Para el transporte de los materiales se ha considerado un camión de 12t (*dataset de Ecoinvent 1 tkm Transport, lorry 7.5-16t, EURO5/RER U*). Se ha considerado una distancia de transporte de 20 km y una densidad de la grava de 2,0 t/m³ y una densidad de la arena de 1,7 t/m³.

5.1.3. Estructura de Madera

La selección y cuantificación de los flujos no elementales¹² que entran en la fase de estructura de madera se detalla en la siguiente tabla. Los datos han sido recogidos de la memoria de mediciones del proyecto:

TABLA 7. Perfil de uso de recursos en la fase de estructura de madera.

Flujo no Elemental	Cantidad	Unidad
Panel contralaminado CLT en forjados de espesor 200 mm.	29,7	m²
Panel contralaminado CLT en forjados de espesor 180 mm.	53,00	m²
Panel contralaminado CLT en forjados de espesor 120 mm.	41,75	m²
Panel contralaminado CLT en forjados de espesor 90 mm.	282,90	m²
Estructura de viguetas de madera laminada y cerramiento de cubierta	102,00	m²
Vigas y elementos auxiliares de madera laminada	0,72	m³
Horas operación grúa	121,00	h

Los inputs necesarios en el proceso de producción del panel contralaminado CLT se han obtenido en parte de la información ambiental proporcionada por la empresa STORA ENSO (Austria, 2011; Stora Enso, 2014) y en parte de referencias bibliográficas (Chen et al., 2019). Asimismo, se ha obtenido información en forma de comunicación personal de la empresa STORA ENSO sobre el tipo de vector energético usado en la planta de producción para la producción de calor (biomasa residual) y el origen de la electricidad usada (hidroeléctrica).

Los consumos energéticos y de materiales considerados para el proceso de producción del panel CLT son los siguientes:

TABLA 8. Consumos para la producción de paneles CLT.

Flujo no Elemental	Cantidad	Unidad
Calor (biomasa residual)	62,00	MJ/m³
Electricidad (hidroeléctrica)	101,00	kWh/m³
Adhesivo (cola de poliuretano)	5,18	kg/m³
Adhesivo (isocianato)	0,82	kg/m³
Madera cepillada	0,9999	m³
Transportes	5,80	tkm

Como vehículo de transporte se ha elegido un camión de más de 32 t (dataset de Ecoinvent *1 tkm Transport, lorry >32t, EURO5/ RER U*). Se ha considerado una distancia de transporte de 1.500 km para los paneles hasta su uso final en la vivienda.

El cerramiento de cubierta se realiza con un panel OSB de 22 mm. El data set de Ecoinvent seleccionado es *1 m³ Oriented strand board, at plant/RER U*.

Se ha incluido también el tratamiento de la madera contra hongos e insectos xilófagos con un producto protector de madera a una dosis de 100 ml/m2 (dataset de Ecoinvent *1 kg Wood preservative, organic salt, Cr-free, at plant/RER S*).

5.1.4. Cimentaciones y Estructura

La selección y cuantificación de los flujos no elementales que entran en la fase de cimentaciones y estructura se detalla en la siguiente tabla. Los datos han sido recogidos de la memoria de mediciones del proyecto:

TABLA 9. Perfil de uso de recursos en la fase de cimentación y estructura.

Flujo no Elemental	Cantidad	Unidad
Encachado	201,67	m²
Hormigón	158,00	m³
Acero corrugado	5.336,9	kg
Transporte hormigón	7.741,95	tkm
Transporte acero	106,74	tkm

Los encachados consisten en una capa de grava de 15 cm de espesor, colocada en sub-base de solera, con una lámina de polietileno galga 400 y geotextil de polipropileno. La cantidad de grava se ha estimado en 0,22 m³/m2 o 319 kg/m² con un total de 6,33 t. La lámina de PE es de baja densidad con 0,1 mm. de grosor. Se ha modelizado considerando el plástico PE de baja densidad (*Polyethylene, low density, granulate {RER}| production | Alloc Def, U*) y un proceso adicional de extrusión (Extrusion, plastic film/RER U). La cantidad total de PE de baja densidad es de 0,1 kg/m² con un total de 20,17 kg. La lámina de geotextil de polipropileno (125 g/m²) se ha modelizado considerando el plástico (*Polypropylene granulate (PP), production mix, at plant RER*) y un proceso adicional de extrusión (*Extrusion of plastic sheets and thermoforming, inline {ES}| processing | Alloc Def, U*). La cantidad total de PP utilizada en el geotextil es de 0,125 kg/m² con un total de 25,21 kg.

El hormigón se ha modelizado utilizando el dataset *Concrete, normal, at plant/ESU* modificado para considerar el mix eléctrico en España en 2018. El acero corrugado se ha modelizado considerando el dataset *Reinforcing steel, at plant/RER U*.

El transporte de todos los materiales se ha modelizado considerando un camión de 12t EURO6 (dataset de Ecoinvent *Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO6 {RoW}| transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO6 | Alloc Def, U*). Se ha considerado una distancia de transporte de 20 km y una densidad del hormigón de 2,45 t/m³.

5.1.5. Albañilería

La selección y cuantificación de los flujos no elementales que entran en la fase de albañilería se detalla en la siguiente tabla. Los datos han sido recogidos de la memoria de mediciones del proyecto:

TABLA 10. Perfil de uso de recursos en la fase de albañilería.

Flujo no Elemental	Cantidad	Unidad
Trasdosados	454,90	m²
Tabiques	85,85	m³
Transportes	225,32	tkm

Los trasdosados consisten en una placa de cartón yeso y aislamiento de lana mineral Isover Arena Basic 1350x600x45mm formado por una estructura de perfiles de chapa de acero galvanizada de 46 mm de ancho, a base de montantes, separados 600 mm entre ellos y canales. Entre la estructura se coloca el aislamiento de lana, a cuyo lado externo se atornillan una placa tipo normal N de 15 mm de espesor. La placa de cartón yeso se ha modelizado utilizando el dataset *Gypsum fibreboard {RoW}| production* y el aislamiento utilizando el dataset *Rock wool, packed, at plant/CH U*. El peso total es de 10,97 kg/m² de trasdosado.

Los tabiques son de cartón yeso formado por una estructura de perfiles de chapa de acero galvanizada de 46 mm de ancho, a base de montantes, separados 600 mm entre ellos y canales, a cada lado de la cual se atornillan dos placas tipo normal N de 13+13 mm de espesor. La placa de cartón yeso se ha modelizado utilizando el dataset *Gypsum fibreboard {RoW}| production*. El peso total es de 17,56 kg/m² de tabique.

El transporte de todos los materiales se ha modelizado considerando un camión de 12t EURO6 (dataset de Ecoinvent *Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO6 {RoW}| transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO6 | Alloc Def, U*). Se ha considerado una distancia de transporte de 20km.

5.1.6. Revestimientos e impermeabilizaciones

La selección y cuantificación de los flujos no elementales que entran en la fase de revestimientos e impermeabilizaciones se detalla en la siguiente tabla. Los datos han sido recogidos de la memoria de mediciones del proyecto:

TABLA 11. Perfil de uso de recursos en la fase de revestimientos e impermeabilizaciones.

Flujo no Elemental	Cantidad	Unidad
Aislamiento y revestimiento exterior 10 cm.	375,39	m²
Aislamiento y revestimiento exterior 20 cm.	39,05	m²
Falso techo placas cartón-yeso	201,49	m²
Lámina impermeable EPDM	125,38	m²
Encachado piedra	143,01	m²
Geotextil poliéster	143,01	m²
Enfoscado de mortero impermeable en baños	24,58	m²
Transportes	936,00	tkm

El aislamiento y revestimiento exterior consiste en un sistema COTETERM, a base de placas rígidas de poliestireno expandido EPS de 10 o 20 cm de espesor anclado mecánicamente con COTETERM anclaje roscado, revestido posterior con cemento COTETERM-M, armado con malla COTETERM STD 167 de fibra de vidrio antialcalino de 4,5x4,5 mm de trama y terminación final decorativa en color con revestimiento acrílico COTETERM ACRYLIC, previo fondeo con imprimación de fondeo COTETERM FONDO.

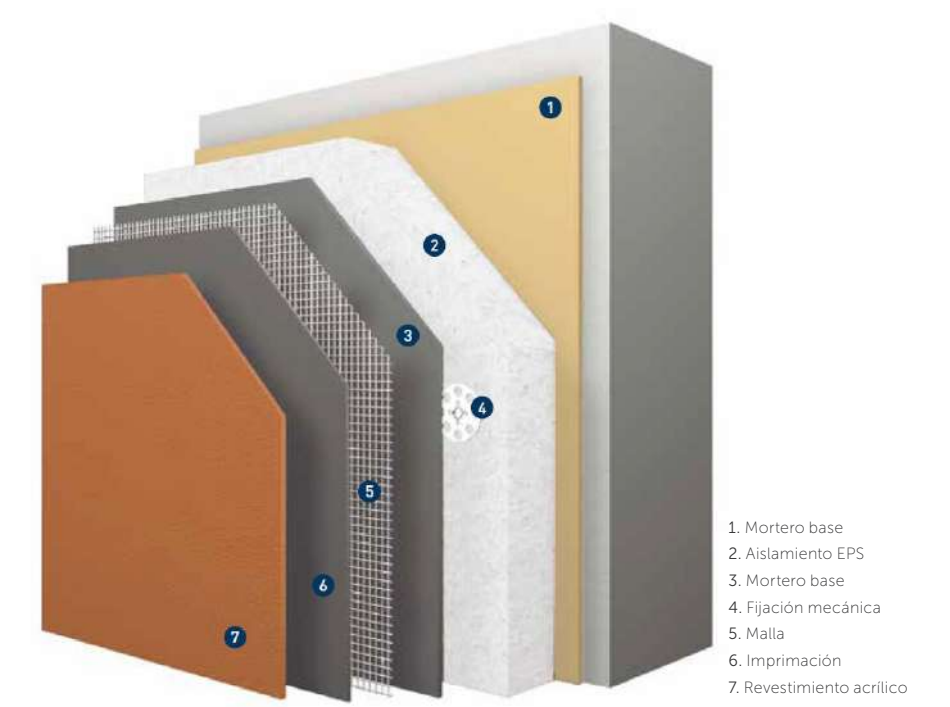


FIG 7. Aislamiento y revestimiento exterior.

Las cantidades de los distintos materiales por m² de revestimiento se han estimado en base a la información publicada en (LAVOLA, 2017) y se resumen en la tabla siguiente. Se ha considerado una densidad del EPS de 50 kg/m³.

TABLA 12.

Flujo no elemental	COTETERM 10	COTETERM 20	Ecoinvent dataset
Mortero	7,95kg	7,95kg	Adhesive mortar, at plant/CH U
Cemento	0,5kg	1kg	Polystyrene foam slab, at plant/ RER U
Arena	2,54kg	2,54kg	Acrylic filler {RoW} production Conseq. U
Malla de fibra de vidrio	0,16kg	0,16kg	Glass fibre, at plant/ RER U

El falso techo de placas de cartón yeso se ha modelizado utilizando el dataset de Ecoinvent *Gypsum fibreboard {RoW}| production*.

El aislamiento térmico en cubiertas invertidas se realiza mediante placas rígidas de poliestireno extruído, URSA XPS NIII L de 80 mm de espesor, i/p.p. de corte y colocación, que se ha modelizado con el dataset de Ecoinvent *Polystyrene, extruded (XPS), at plant/RER U*. Se ha considerado una densidad de 32 kg/m³ por lo que la cantidad de XPS por metro cuadrado es de 2,56 kg.

Se ha considerado el suministro y colocación de lámina impermeable tipo EPDM de 1,14 mm de espesor en cubiertas, petos y albardillas. La densidad de la lámina de EPDM es de 120 kg/m³ por lo que la cantidad de EPDM es de 0,1368 kg/m². Para modelizarlo se ha considerado el dataset de la base de datos ETH *EPDM rubber ETH U*.

El suministro y colocación de geotextil Danofelt PY-200 de poliéster punzonado, con un peso de 200 gr/m², se ha modelizado con el dataset de IDEMAT *Polyester fabric I*.

Se ha considerado una distancia de transporte de 20 km para todos los materiales, considerando un camión de 12t EURO6 (dataset de Ecoinvent *Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO6 {RoW}| transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO6 | Alloc Def, U*).

5.1.7. Solados y alicatados

La selección y cuantificación de los flujos no elementales que entran en la fase de solados y alicatados se detalla en la siguiente tabla. Los datos han sido recogidos de la memoria de mediciones del proyecto:

TABLA 13. Perfil de uso de recursos en la fase de solados y alicatados.

Flujo no Elemental	Cantidad	Unidad
Chapado de piedra caliza Campaspero de 40x40 cm y de 2 de espesor, apomazada	25,26	m²
Solado de piedra caliza Campaspero al corte en piezas de 60x30x2 cm	228,53	m²
Rodapié suelos perfil chapa lacada al horno 110 mm desarrollo	125	m
Peldaño compuesto por dado macizo de piedra caliza Campaspero, en medidas de 60x27x18,5 cm con acabado apomazado	3	ud
Recrecido con mortero de cemento autonivelante tipo plastón de espesor 5 cm	198,85	m²
Encachado piedra	143,01	m²
Transportes	2196	tkm

Para los chapados de piedra se ha considerado que son recibidos con mortero de cemento CEM II/A-P 32,5 R y arena de río 1/6 (M-40). Para los solados se ha considerado que son recibidos con mortero de cemento CEM II/B-P 32,5 N y arena de miga 1/6, con una cama de arena de 2 cm de espesor.

El rodapié es de aluminio con un espesor de 0,8 mm. Se ha considerado una densidad de 2,698 kg/m3 y se ha modelizado con el dataset de Ecoinvent *Aluminium, production mix, at plant/ RER U*.

Se ha considerado una distancia de transporte para la piedra de solados y chapados de 160 km y de 20 km para el resto de materiales considerando un camión de 12t EURO6 (dataset de Ecoinvent *Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO6 {RoW}*)| *transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO6* | *Alloc Def, U*).

5.1.8. Fontanería

La selección y cuantificación de los flujos no elementales que entran en la fase de fontanería se detalla en la siguiente tabla. Los datos han sido recogidos de la memoria de mediciones del proyecto:

TABLA 14. Perfil de uso de recursos en la fase de fontanería.

Flujo no Elemental	Cantidad	Unidad
Tubo de polietileno de 32 mm.	132,5	m
Inodoro de pie de Gala modelo EMMA	1	ud
Inodoro de porcelana vitrificada en blanco modelo Emma de Gala colgado	2	ud
Lavabo de piedra Campaspero maciza y rebajada de medidas aproximadas 160x36x19 cm.	1	ud
Ducha de obra con solado de piedra caliza Campaspero	2	m²
Bañera Vithos de Roca de 170x80	1	ud
Bidé colgado Emma	1	ud
Encimeras de piedra Campaspero	48,6	kg
Plato de ducha modelo Silex de la marca Fiora de medida máxima 1,00m x 169m	1	ud
Lavabo Bathco modelo Castellón u Olea	1	ud

Las tuberías polietileno se han modelizado considerando el plástico (*Polyethylene, high density, granulate {GLO}*)| *market for* | *APOS, S*) y un proceso adicional de extrusión (*Extrusion, plastic pipes/ES U*). La cantidad total de PE utilizada en las tuberías es de 64 kg.

El lavabo y encimera de piedra se han modelizado considerando el dataset *Limestone ETH U*. Las duchas de obra se han modelizado como los solados de piedra considerando la piedra recibida con mortero de cemento CEM II/A-P 32,5 R y arena de río 1/6 (M-40).

La bañera Vithos es de material acrílico y se ha modelizado con el dataset *1 kg Acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer, ABS, at plant/ RE*. El resto de sanitarios se han modelizado con el dataset *Sanitary ceramics, at regional storage/CH U*.

Para todos los materiales se han considerado una distancia de transporte de 20km considerando un camión de 12t EURO6 (dataset de Ecoinvent *Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO6 {RoW}*)| *transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO6* | *Alloc Def, U*).

5.1.9. Electricidad





La selecció n y cuantificació n de los flujos no elementales que entran en la fase de electricidad se detalla en la siguiente tabla. Los datos han sido recogidos de la memoria de mediciones del proyecto:

TABLA 15. Perfil de uso de recursos en la fase de electricidad.

Flujo no Elemental	Cantidad	Unidad
Lámparas SWAP	26	ud
LEDs en armarios y puerta principal	4,52	m
Focos de iluminación en jardín y pasillos BREINCO Hubble 05-9722-05-37	12	ud
Apliques BOX exteriores IP65 2xled 4W 220-240VAC 50-60Hz W&D	4	ud
Tubo PVC corrugado	6656	m
Cable 6*1	173,24	m
Cable 2.5*1	3464,86	m
Cable 1.5*1	2309,9	m
Cable 6*3	77	m
Cable 2,5*3	53,9	m
Cable 1,5*5	38,5	m
Cable 1,5*3	538,98	m

Los pesos de los materiales de las luminarias LED son las que se muestra en la siguiente tabla:

TABLA 16. Materiales de luminarias.

Luminaria	Peso	Material	Ecoinvent/ELCD dataset
Lámparas SWAP	215 g.	Policarbonato 90% LED 10%	<i>Polycarbonate, at plant/RER U Light emitting diode {GLO} market for Cut-off, U</i>
	LEDs en armarios y puerta principal	300 g.	Policarbonato 90% LED 10%
	Focos de iluminación en jardín y pasillos BREINCO Hubble 05-9722-05-37	730 g.	Policarbonato 30% Cristal 30% Acero galvanizado 30% LED 10%
	Apliques BOX exteriores IP65 2xled 4W 220-240VAC 50-60Hz W&D	250 g.	0,16kg
			<i>Polycarbonate, at plant/RER U Light emitting diode {GLO} market for Cut-off, U</i>

Para el tubo de PVC corrugado se ha considerado un diámetro de 16 mm y un peso de 0,05 kg/m. Se ha modelizado considerando un plástico de PVC (dataset *Polyvinylidenchloride, granulate {GLO}| market for | Alloc Def, U*) y un proceso adicional de extrusión (*Extrusion, plastic pipes/ES U*). En total el peso de PVC necesario para todo el tubo es de 405 kg.

El cable se ha modelizado con el dataset *1 kg Cable, unspecified {GLO}| production | Cut-off, U*.

Para todos los materiales se han considerado una distancia de transporte de 20 km considerando un camión de 12t EURO6 (dataset de Ecoinvent *Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO6 {RoW}| transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO6 | Alloc Def, U*).

5.1.10. Suelo radiante y aerotermia¹⁴

La selección y cuantificación de los flujos no elementales que entran en la fase de suelo radiante y aerotermia se detalla en la siguiente tabla. Los datos han sido recogidos de la memoria de mediciones del proyecto:

TABLA 17. Perfil de uso de recursos en la fase de suelo radiante y aerotermia.

Flujo no Elemental	Cantidad	Unidad
Hoja de polipropileno	400	m²
Tira perimetral	300	m
Plancha plus 40/65	190,66	m²
Tubería polytherm EVOHFLEX 16mm	2200	m
Tubería polietileno reticulado (PEX) ø32	400	m
Tubería polietileno reticulado (PEX) ø25	40	m
Tubería polietileno reticulado (PEX) ø20	20	m
Aislamiento Calefacción tubería ø32 distribución interior	40	m
Aislamiento Calefacción tubería ø25 distribución interior	40	m
Aislamiento Calefacción tubería ø20 distribución interior	20	m
Depósito para acumulación y producción de agua caliente	1	ud
Tubería de cobre deshidratada calorifugada 6,4 mm	19	m
Tubería de cobre deshidratada calorifugada 9,5 mm	27,20	m
Tubería de cobre deshidratada calorifugada 12,7 mm	19	m
Tubería de cobre deshidratada calorifugada 15,9 mm	27,20	m
Unidad exterior BOMBA DE CALOR, MARCA SAMSUNG	1	ud
Unidad intercambio de calor Aire - Agua de 16 Kw marca SAMSUNG modelo NH160PHXEA	1	ud

¹⁴**Aerotermia.** Sistema de climatización que utiliza tecnología limpia basada en el aprovechamiento de la energía almacenada en forma de calor en el aire del medio ambiente. Está compuesto por un equipo de calefacción/climatización y/o generación de agua caliente sanitaria, que se basa en extraer la mencionada energía del aire exterior (ambiente) mediante una bomba de calor. De esta forma, el aire se considera la fuente renovable que se usa para climatizar los espacios cerrados.

La hoja de polietileno colocada debajo del aislamiento se usa como barrera anti-vapor en aquellas zonas que se encuentre en contacto con el terreno.

La lámina de PE es de baja densidad con 0,2 mm de grosor. Se ha modelizado considerando el plástico PE de baja densidad (*Polyethylene, low density, granulate {RER}| production | Alloc Def, U*) y un proceso adicional de extrusión (*Extrusion, plastic film/RER U*). La cantidad total de PE de baja densidad es 75,2kg.

La tira perimetral es un aislamiento periférico de espuma de poliestireno de 7 mm de espesor y 150 mm de altura, con film de PE pegado para proteger las juntas de la dilatación del mortero. La plancha plus 40/65 es una plancha aislante termo-acústico de espuma de poliestireno expandido PLUS 40/45, según norma UNE-EN 13.163, con revestimiento plástico como protección de la capa aislante para unión hermética de las placas. Se ha considerado que el EPS tiene una densidad de 28 kg/m3 por lo que la cantidad total de EPS considerada es de 237,6 kg. Se ha modelizado considerando el material *Polystyrene foam slab, at plant/RER U*.

Las tuberías de PEX de polietileno reticulado se ha considerado que tienen una densidad de 950 kg/m³ y se han modelizado considerando un plástico de PE de alta densidad (dataset *Polyethylene, high density, granulate {GLO}| market for | APOS, S*) y un proceso adicional de extrusión (dataset *Extrusion, plastic pipes/ES U*). En total el peso de PE necesario para todas las tuberías es de 173,47kg.

Las tuberías de Polietileno reticulado PEX en multicapa para calefacción y agua caliente sanitaria se ha considerado que tienen una densidad de 1.470 kg/m³ y están compuestas por dos capas exterior e interior de polietileno (PEX o PERT) y una capa intermedia de aluminio. Se ha considerado que el 30% en peso es aluminio (dataset *Aluminium, production mix, at plant/RER U*) y el 70% PE modelado como el PEX anterior.



FIG 8. Tubería de PEX multicapa.

El aislamiento de las tuberías de calefacción se hace con espuma elastomérica que se ha modelizado con el dataset *Synthetic rubber, at plant/RER U*. El depósito para acumulación y producción de agua caliente es de 300 litros de capacidad, fabricado en acero vitrificado y con un peso de 86 kg. Para su modelización se ha considerado un acero 18:8 (dataset *Chromium steel 18/8, at plant/RER U*).

Las tubería de cobre se han modelizado con el dataset de ELCD *Copper tube, technology mix, consumption mix, at plant*. La cantidad de cobre total es de 36,5 kg.

La bomba de calor se ha modelizado considerando el siguiente inventario de materiales obtenido de (Greening and Azapagic, 2012):

TABLA 18. Inventario de materiales de la bomba de calor.

Componente	Material	Cantidad
Evaporador y condensador	Acero	32 kg.
Compresor	Acero	120 kg.
Cableado, tuberías y válvula de expansión	Cobre	35,2 kg.
Aislamiento tuberías	Elastómero	16 kg.
Aislamiento cableado	PVC	1,6 kg.
Aceite lubricante	Aceite lubricante	2,7 kg.
Ventilador	Cobre	1,4 kg.
	HDPE ¹⁵	0,5 kg.
Refrigerante	R-134 ⁹	4,9 kg (+3% perdidas en fabricación y 6% anual en operación)
Ensamblado	Electricidad	504 MJ
	Gas natural	1400 MJ

¹⁵HDPE. *High Density Polyethylene*. Polietileno de alta densidad. Material polimérico.

5.1.11. Carpintería de madera y armarios

La selección y cuantificación de los flujos no elementales que entran en la fase de carpintería de madera y armarios se detalla en la siguiente tabla. Los datos han sido recogidos de la memoria de mediciones del proyecto:

TABLA 19. Perfil de uso de recursos en la fase de carpintería de madera y armarios.

Flujo no Elemental	Cantidad	Unidad
Puerta de paso ciega de medida estándar 205x85 y 205x75 cm, lisa de DM macizo lacada en blanco	8	ud
Puerta de paso ciega de medida estandar 280x72cm, lisa de DM macizo para lacar	1	ud
Módulo de armario prefabricado de Ikea altura máxima 2,36, de 2 puertas de 0,50x2,36 m y de profundida 60 cm, con postizo de medidas 0,25x2,50m	1	ud
Armario de baño formado por estructura colgada IKEA BESTA de medidas 60x20x30 cm, con puerta a medida de DM y lacada en blanco	1	ud

El material de puertas y armarios se ha modelizado con el dataset 1 m3 Medium density fibreboard, at plant/RER U.

Se han considerado una distancia de transporte de 20 km considerando un camión de 12t EURO6 (dataset de Ecoinvent Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO6 {RoW}| transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO6 | Alloc Def, U).

5.1.12. Carpintería de PVC y cerrajería

La selección y cuantificación de los flujos no elementales que entran en la fase de carpintería de PVC y cerrajería se detalla en la siguiente tabla. Los datos han sido recogidos de la memoria de mediciones del proyecto (Ver Tabla 18).

El marco de PVC de las ventanas se ha modelizado con el dataset *1 m² Window frame, poly vinyl chloride, U=1.6 W/m²K {GLO}| market for | Cut-off, U (of project Ecoinvent 3 - allocation, cut-off by classification - unit)* y el vidrio con el dataset *1 kg Flat glass, uncoated {GLO}| market for | Cut-off, U.*

Se han considerado una distancia de transporte de 20 km considerando un camión de 12t EURO6 (dataset de Ecoinvent *Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO6 {RoW}| transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO6 | Alloc Def, U.*

Las puertas de chapa lisa de acero se han modelizado con el dataset *1 kg Steel hot dip galvanized (ILCD), blast furnace route, production mix, at plant, 1kg, typical thickness between 0.3 - 3 mm. typical width between 600 - 2100 mm. GLO S.*

TABLA 20. Perfil de uso de recursos en la fase de carpintería de PVC y cerrajería.

Flujo no elemental	Cantidad	Unidad	kg. vidrio	m² marco
Ventana de 1 hoja practicable con fijos laterales. Serie PVC Schüco CORONA CT70AS, en color blanco de medidas Ancho: 2,83 y Alto: 1,30 m. Vidrio 4+4/15/4	1	Ud	282	0,93
Ventana de 1 hoja practicable con fijos laterales. Serie PVC Schüco CORONA CT70AS, en color blanco de medidas Ancho: 2,20 y Alto: 2,20 m. Vidrio 6/18/6 y Vidrio 4+4/15/4.	1	Ud	748	1,00
Ventana fija. Serie PVC Schüco CORONA CT70AS, en color blanco. De medidas Ancho: 1,40 Alto: 1,40 m. Vidrio 4+4/15/4 Planitherm.	1	Ud	142	0,36
Ventana fija. Serie PVC Schüco CORONA CT70AS, en color blanco. De medidas Ancho: 2,21 y Alto 1,40 m. Vidrio 4+4/15/4	1	Ud	233	0,47
Ventana fija. Serie PVC Schüco CORONA CT70AS, en color blanco. De medidas Ancho: 1,20 y Alto: 1,20 m. Vidrio 4+4/15/4	1	Ud	102	0,31
Ventana de 1 hoja practicable. Serie PVC Schüco CORONA CT70AS, en color blanco. De medidas Ancho: 800 y Alto: 1,30. Vidrio 4+4/15/4	1	Ud	73	0,45
Ventana de 1 hoja practicable. Serie PVC Schüco CORONA CT70AS, en color blanco. De medidas Ancho: 1,00 y Alto: 2,00 m. Vidrio 4+4/15/4	1	Ud	145	0,66
Ventana de 1 hoja practicable con fijo lateral. Serie PVC Schüco CORONA CT70AS, en color blanco. De medidas Ancho: 1,80 y Alto: 2,00 m. Vidrio 4/15/4 y Vidrio 4+4/12/4	1	Ud	455	0,85
Ventana de 1 hoja practicable con fijo lateral. Serie PVC Schüco CORONA CT70AS, en color blanco. Ancho: 2,00 y Alto: 1,60 m. Vidrio 4+4/15/4	1	Ud	242	0,81
Ventana de 1 hoja practicable. Serie PVC Schüco CORONA CT70AS, en color blanco. Ancho 1,20 y Alto: 1,20 m. Vidrio 4/15/4	1	Ud	88	0,52
Ventana de 1 hoja practicable con fijo lateral. Serie PVC Schüco CORONA CT70AS, en color blanco. Ancho: 2,01 y Alto: 2,20. Vidrio 4/15/4	1	Ud	303	0,95
Ventana de 1 hoja practicable con fijo lateral. Serie PVC Schüco CORONA CT70AS, en color blanco. Ancho: 2,00 y Alto: 2,20 m. Vidrio 4/15/4	1	Ud	301	0,95
Ventana de 1 hoja practicable con fijo lateral. Serie PVC Schüco CORONA CT70AS, en color blanco. Ancho: 2,00 y Alto: 1,75 m. Vidrio 6/15/6	1	Ud	267	0,84
Ventana de 1 hoja practicable. Serie PVC Schüco CORONA CT70AS, en color blanco. Ancho: 1,00 y Alto: 1,80. Vidrio 4/15/4	1	Ud	112	0,61
Ventana de 1 hoja practicable con fijo lateral. Serie PVC Schüco CORONA CT70AS, en color blanco. Ancho: 2,10 y Alto: 1,70 m. Vidrio 4/15/4 y Vidrio 4/16/4	1	Ud	451	0,85
Puerta de entrada a la vivienda fabricada en chapa lisa de medidas máximas 1,20x2,65 m	1	Ud		
Puerta de entrada al trastero de chapa lisa 0,70x1,945 m	1	Ud		
Puerta de entrada peatonal a la parcela abatible y fabricada de chapa de 1 cm, 0,79x2,04	1	Ud		
Puerta de entrada de carruajes a la parcela, corredera y motorizada, fabricada de chapa lisa de 1 cm. 3,00x2,04m	1	Ud		
Ventana corredera minimalista 3 hojas 3 carriles. Ancho: 5,248 y Alto: 2,80 m	1	Ud		

5.1.13. Vidriería

La selección y cuantificación de los flujos no elementales que entran en la fase de vidriería se detalla en la siguiente tabla. Los datos han sido recogidos de la memoria de mediciones del proyecto:

TABLA 21. Perfil de uso de recursos en la fase de vidriería.

Flujo no Elemental	Cantidad	Unidad
Espejo plateado realizado con una luna float incolora de 5 mm	7,93	m²
Mampara de ducha fija sujeta al suelo y a la pared de la ducha	7,46	m²

Se ha considerado una distancia de transporte de 20 km considerando un camión de 12t EURO6 (dataset de Ecoinvent *Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO6 {RoW}*| *transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO6* | *Alloc Def, U*).

5.1.14. Pintura

La selección y cuantificación de los flujos no elementales que entran en la fase de pintura se detalla en la siguiente tabla. Los datos han sido recogidos de la memoria de mediciones del proyecto:

TABLA 22. Perfil de uso de recursos en la fase de pintura

Flujo no Elemental	Cantidad	Unidad
Pintura plástica acrílica lisa mate lavable profesional, en blanco, sobre paramentos horizontales y verticales, dos manos, incluso imprimación	652,75	m²
Pintura al esmalte sintético con laca ni-trocelulósica terminación satinada, sobre carpintería de madera	132,16	m²
Pintura al oxirón gris-negro, dos manos y una mano de minio o antioxidante sobre carpintería metálica o cerrajería	41,26	m²

La pintura de paredes se ha modelizado con el data set: *Alkyd paint, white, without solvent, in 60% solution state {RER}* y la pintura al esmalte sintético y al oxiron se han modelizado con el dataset: *Alkyd paint, white, without water, in 60% solution state {RER}*. Para la pintura de paredes se ha considerado que se necesitan 0,25 kg/m². Para la pintura al esmalte se ha considerado que se necesitan 0,29 kg/m².

Se ha considerado una distancia de transporte de 20 km considerando un camión de 12t EURO6 (dataset de Ecoinvent *Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO6 {RoW}*| *transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO6* | *Alloc Def, U*).

5.2. Fase de Uso

5.2.1. Mantenimiento y reparaciones

En la fase de mantenimiento se ha considerado que se necesita pintar el interior de la vivienda cada 5 años y el exterior de la vivienda cada 20 años. Se ha considerado la sustitución de las lámparas LED que se ha considerado tienen una vida de 12.5 años. En cuanto a la instalación de aerotermia se ha considerado que la bomba de calor se reemplaza una vez en la vida útil del edificio. Se ha considerado asimismo que se sustituyen las ventanas una vez en la vida útil del edificio.

5.2.2. Mantenimiento y reparaciones

Todos los consumos energéticos de la vivienda son eléctricos. Para la calefacción, refrigeración y ACS se utiliza una bomba de calor aire-agua de expansión directa. Los consumos estimados de la casa en calefacción, refrigeración y agua caliente sanitaria son los siguientes:

TABLA 23. Consumos energéticos en la etapa de uso de la vivienda.

	kWh/m2 y año
ACS	6,66
Calefacción	16,71
Refrigeración	11,63

El consumo de energía se ha calculado utilizando el paquete de planificación pasiva de viviendas (PHPP) ("Passivhaus Institut", 2019), una de las herramientas que utiliza el Passivhaus Institut para certificar edificios. La herramienta se alimenta con datos sobre las principales características estructurales, detalles de construcción, variantes de diseño del edificio y datos climáticos de sus ubicaciones, y entrega su demanda de energía. La herramienta PHPP ha demostrado su capacidad para predecir el uso de energía de edificios en muchos estudios (The Passive House Resource, 2019). Aunque este edificio no es una casa certificada, se ha construido bajo los estándares de la Passive House, y la herramienta se ha utilizado para proporcionar escenarios de consumo alternativos basados en diferentes combinaciones constructivas utilizadas para el análisis de sensibilidad.

Los datos utilizados para la estimación del consumo de energía incluyen el valor de transmitancia (U) de cada solución de sistema de construcción, el área de la fachada, la orientación y el índice de sombra entre otros. También se estudia cada ventana del edificio, teniendo en cuenta el material y el tipo de vidrio de cada uno, así como su orientación, su distancia al borde de la fachada, sus elementos de sombreado, etc. Las ventanas son un elemento fundamental a tener en cuenta tanto para pérdidas como para ganancias de energía. Finalmente, se consideran todos los sistemas mecánicos del edificio: calefacción, refrigeración, agua caliente, electricidad y sistema de ventilación. Combinando todos estos datos, la herramienta PHPP calcula la demanda de energía para calefacción y refrigeración kWh / (m²a).

El dataset utilizado para la electricidad es *1 MJ Electricity, low voltage {ES}| market for | Cut-off, U*.

El consumo en iluminación se estima en 127,26 kWh/m² y año. El resto de consumos eléctricos no se ha considerado al no estar relacionados con la construcción o comportamiento del edificio.

El consumo estimado de agua es de 50 l/persona y día. Se ha considerado una ocupación de la vivienda de 4 personas. El data set utilizado es *1 kg Tap water, at user/ES U*.

5.3. Fase de Uso
5.3.1. Demoliciones y desmontajes

Las demoliciones tienen lugar al final de la vida útil del edificio estimada en 50 años. Se demuele el edificio separando 5 corrientes de residuos: madera, hormigón, metales, gravas y resto.

Las corrientes de residuos se han estimado en las siguientes cantidades, indicadas en la Tabla 24.

TABLA 24. Corrientes de residuos en la etapa de demolición de la vivienda.

Corriente	Material	t
Madera		23,88
Hormigón	Hormigón armado	233,31
	Hormigón	4,81
Metales	Aluminio	0,19
	Cobre	0,17
	Acero	5,42
	Puertas chapa	2,31
		8,09
Gravas	Grava encachados	8,09
Resto	Trasdosados, tabiques y falsos techos	10,04
	Morteros	17,20
	Ladrillos	1,46
	Piedra	14,08
	EPS y XPS	0,84
	Plásticos (PE y PVC)	1,11
	Espuma elastomética	0,04
	Saneamientos	0,11
	Vidrios	0,28
	Ventanas	4,91
		50,06
TOTAL		430,11

Las demoliciones de hormigón se realizan con el martillo rompedor de la retro y los tabiques y techos con martillo eléctrico. Las estructuras de madera se desmontan para su reciclado y reutilización. Se ha considerado el mismo consumo energético que para su montaje.

Respecto de la energía de las demoliciones se han considerado lo siguiente (PEF4BUILDINGS, 2018):

TABLA 25. Consumos energéticos en la etapa de demolición.

	t	MJ/kg
Hormigón armado	233	0,0612
Hormigón	4,81	0,0437
Morteros	7,20	0,0437
Ladrillos	1,46	0,0359
Trasposados, tabiques y falsos techos	10,04	0,0359
Piedra	13,79	0,0437

Se ha considerado el reciclaje de los siguientes materiales: madera, acero y hormigón.
Para el cálculo de los perfiles de uso de recursos de estos materiales se ha utilizado la siguiente fórmula propuesta por la metodología (Diario Oficial de la Unión Europea, 2013):

$$\left(1-\frac{R_1}{2}\right) \times E_V + \frac{R_1}{2} \times E_{recycled} + \frac{R_2}{2} \times \left(E_{recycledEoL} - E^*_v \times \frac{Q_S}{Q_P}\right) + R_3 \times \left(E_{ER} - LHV \times X_{ER,heat} - LHV \times X_{ER,elec}\right) + \left(1-\frac{R_2}{2} - R_3\right) E_D - \frac{R_1}{2} \times E^*_D$$

Se ha considerado que en todos los casos R1 (contenido de material reciclado) es cero.
En el caso del hormigón y el acero se ha considerado que R3 (proporción de material en el producto que se utiliza para la valorización energética) es también cero. En el caso de la madera, R3 es 7%.
Por tanto, en el caso del hormigón y el acero, la ecuación queda de la siguiente forma:

$$E_V + \frac{R_2}{2} \times \left(E_{recycledEoL} - E^*_v \times \frac{Q_S}{Q_P}\right) + \left(1-\frac{R_2}{2}\right) E_D$$

Donde,
E_v son las emisiones específicas y recursos consumidos (por unidad de análisis) resultantes de la adquisición y el tratamiento previo de material virgen.
R₂ es la fracción de material que se recicla. Para cada material se han considerado los % de reciclado que reporta Eurostat para España:

Acero: 100%
Madera: 91%
Hormigón: 71%

E_{recyclingEoL} son las emisiones específicas y recursos consumidos (por unidad de análisis) resultantes del proceso de reciclado en la etapa de fin de vida, incluidos los procesos de recogida, clasificación y transporte.
E_v^{*} son las emisiones específicas y recursos consumidos (por unidad de análisis) resultantes de la adquisición y el tratamiento previo de material virgen supuestamente sustituido por materiales reciclables.
Consideramos que E_v y E_v^{*} son iguales.

Qs es la calidad del material secundario, es decir, calidad del material reciclado.
Qp es la calidad del material primario, es decir, calidad del material virgen.

Se asume que el precio de los materiales primarios respecto al de los secundarios sirve como indicador de la calidad. En tal situación, Qs /Qp correspondería a la proporción entre precio de mercado del material secundario (Qs) y precio de mercado del material primario (Qp).
R₃ es la proporción de material en el producto que se utiliza para la valorización energética (por ejemplo, incineración con valorización energética en la etapa de fin de vida (0=<R 3 =<1). En el caso de la madera este porcentaje es de un 7%.

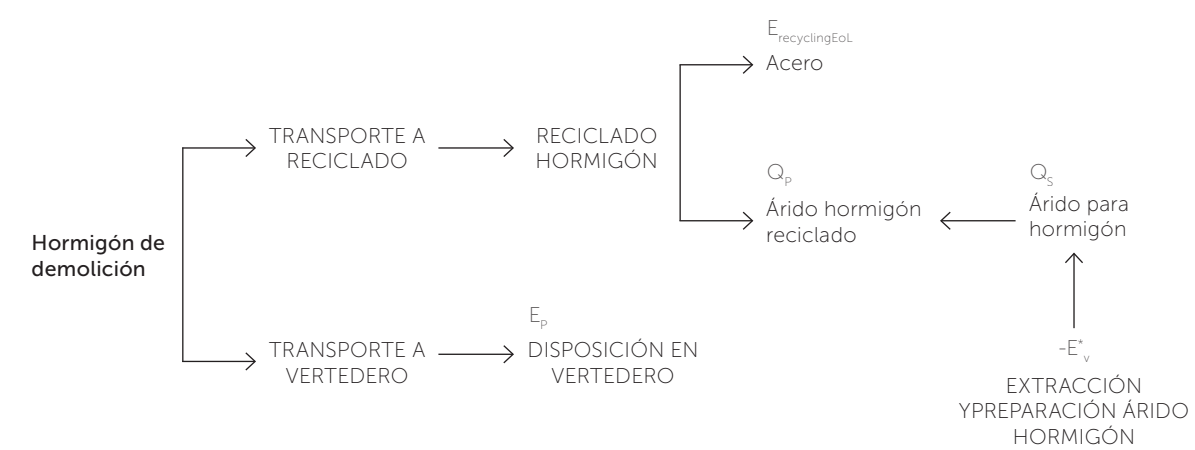
E_{ER} = emisiones específicas y recursos consumidos (por unidad de análisis) resultantes del proceso de valorización energética.
E_{SE,heat} y E_{SE,elec} son las emisiones específicas y recursos consumidos (por unidad de análisis) que habrían resultado de la fuente de energía específica sustituida, calor y electricidad, respectivamente.
LHV es el poder calorífico inferior del material presente en el producto que se utiliza para la valorización energética.

X_{ER,heat} y X_{ER,elec} son la eficacia del proceso de valorización energética tanto para el calor como para la electricidad.
E_D son las emisiones específicas y recursos consumidos (por unidad de análisis) resultantes de la eliminación de residuos en la etapa de fin de vida del producto analizado, en este caso depósito en vertederos.

FIN DE VIDA DEL HORMIGÓN

En el caso del fin de vida del hormigón se ha considerado que un 71% del hormigón se transporta a una instalación de reciclado y un 29% se lleva a vertedero. El reciclaje del hormigón consiste en un proceso de machacado del hormigón seguido de un proceso de tratamiento de la grava de hormigón en una planta clasificadora (*Disposal, building, concrete gravel, to sorting plant/CH U*). Se considera que el acero de las armaduras se separa de forma magnética y se manda a reciclado.

Figura 9. Procesos de fin de vida del hormigón

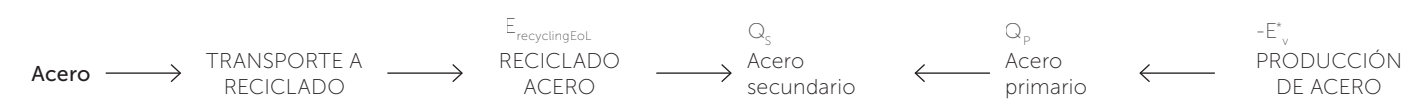


Se considera que las gravas provenientes del proceso de reciclado tienen la misma calidad que las provenientes de material primario.

FIN DE VIDA DEL ACERO

En el caso del fin de vida del acero se ha considerado que un 100% del acero se transporta a una instalación de reciclado y no se lleva nada a vertedero. El reciclaje del acero consiste en un proceso de clasificación y prensado de la chatarra y su transporte a una instalación de producción de acero.

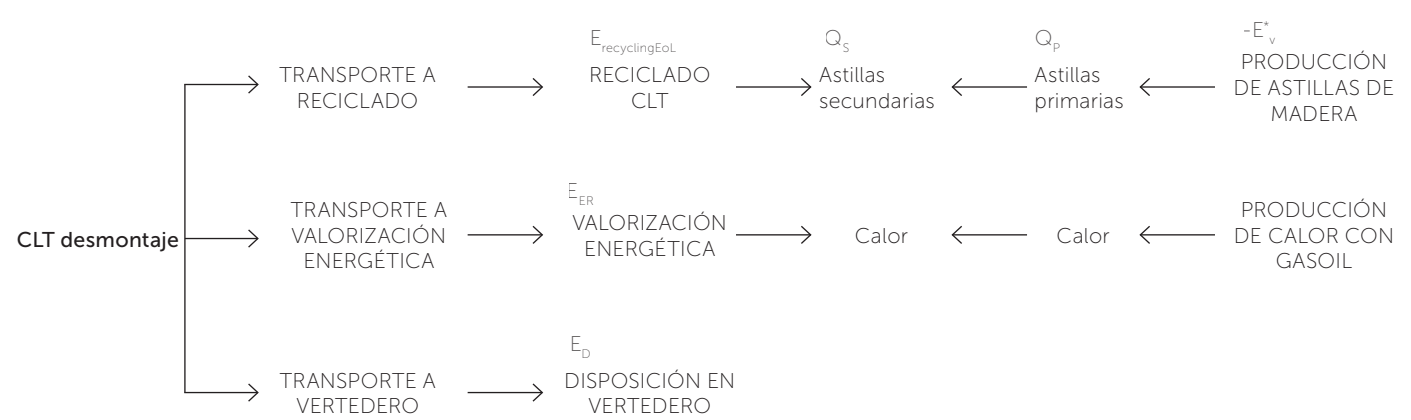
Figura 10. Procesos de fin de vida del acero



FIN DE VIDA DE LA MADERA

En el caso del fin de vida de los paneles de CLT se ha considerado que un 91% de la madera se reutiliza de nuevo para producción de tablero OSB, un 7% se incinera y un 2% se lleva a vertedero. El proceso de reciclaje consiste en un proceso de clasificación, limpieza, trituración y almacenamiento. Las virutas obtenidas sustituyen a las astillas de madera usadas en la fabricación de tableros OSB (*Industrial wood, softwood, under bark, u=140%, at forest road/RER U*). No se ha considerado que exista pérdida de calidad entre estas astillas y las astillas primarias. En cuanto a la valorización energética se considera que la madera se quema para producción de calor que sustituye a calor producido con gasoil.

Figura 11. Procesos de fin de vida de la madera



Asimismo se ha considerado que la grava de los encachados se reutiliza sin ningún tipo de tratamiento. Se considera un 5% de pérdidas en este proceso.

5.3.4. DISPOSICIÓN EN VERTEDERO

El resto de los materiales que no se reciclan o reutilizan se llevan directamente a vertedero. Todos ellos se consideran inertes.

6. EVALUACIÓN DE IMPACTO DE LA HUELLA AMBIENTAL DE LA VIVIENDA

Una vez compilado el perfil de uso de los recursos y de emisiones, se ha realizado la evaluación de impacto de la HA para calcular el comportamiento ambiental de la vivienda, utilizando los modelos y las categorías de impacto de la HA seleccionados en la sección 1. Esta etapa describe las presiones existentes sobre el medio ambiente con una perspectiva del ciclo de vida.

6.1. IMPACTOS DE LA ETAPA DE CONSTRUCCIÓN

Los resultados de la evaluación de impactos de la etapa de construcción del edificio se resumen en la siguiente tabla.

Impacto	Indicador	Total	Total/m²
Cambio climático	kg CO ₂ eq	96366,83	390,15
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC11 eq	0,05	2,04E-04
Radiaciones ionizantes	kBq U-235 eq	8839,24	35,79
Formación de ozono troposférico	kg NMVOC eq	351,12	1,42
Enfermedades respiratorias	disease inc.	0,005	2,11E-05
Toxicidad humana - efectos no cancerígenos	CTU _n	0,02	7,23E-05
Toxicidad humana - efectos cancerígenos	CTU _n	0,003	1,41E-05
Acidificación terrestre	mol H ⁺ eq	502,86	2,04
Eutrofización agua dulce	kg P _{eq}	31,08	0,13
Eutrofización agua marina	kg N _{eq}	101,19	0,41
Eutrofización terrestre	mol N _{eq}	1145,49	4,64
Ecotoxicidad agua dulce	CTUe	79970,03	323,77
Uso del suelo	Pt	278827,68	1128,86
Consumo del agua	m3 depriv.	9031444,89	36564,55
Uso de energía	MJ	1053221,33	4264,05
Uso de recursos minerales y metálicos	kg Sb _{eq}	0,61	0,002

Tabla 26. Resultados de la evaluación de impactos de la etapa de construcción del edificio

Se ha realizado una normalización de los resultados con el objeto de calcular la magnitud de su contribución a las categorías de impacto de la HA y compararla con una unidad de referencia (normalmente la presión relacionada con dicha categoría como consecuencia de las emisiones globales). Como consecuencia de ello, se obtienen resultados adimensionales y normalizados. Esto permite comparar la importancia de las contribuciones de la HA calculada con dicha unidad de referencia y evaluar en más detalle los impactos cuyos resultados normalizados son más importantes.

Los resultados normalizados se muestran en la Figura 12. Como se puede observar los más importantes son los relativos a:

- Agotamiento de agua;
- Toxicidad humana;
- Eutrofización de agua dulce;
- Uso de energía;
- Cambio climático.

Estos impactos serán los que serán analizados en más detalle.

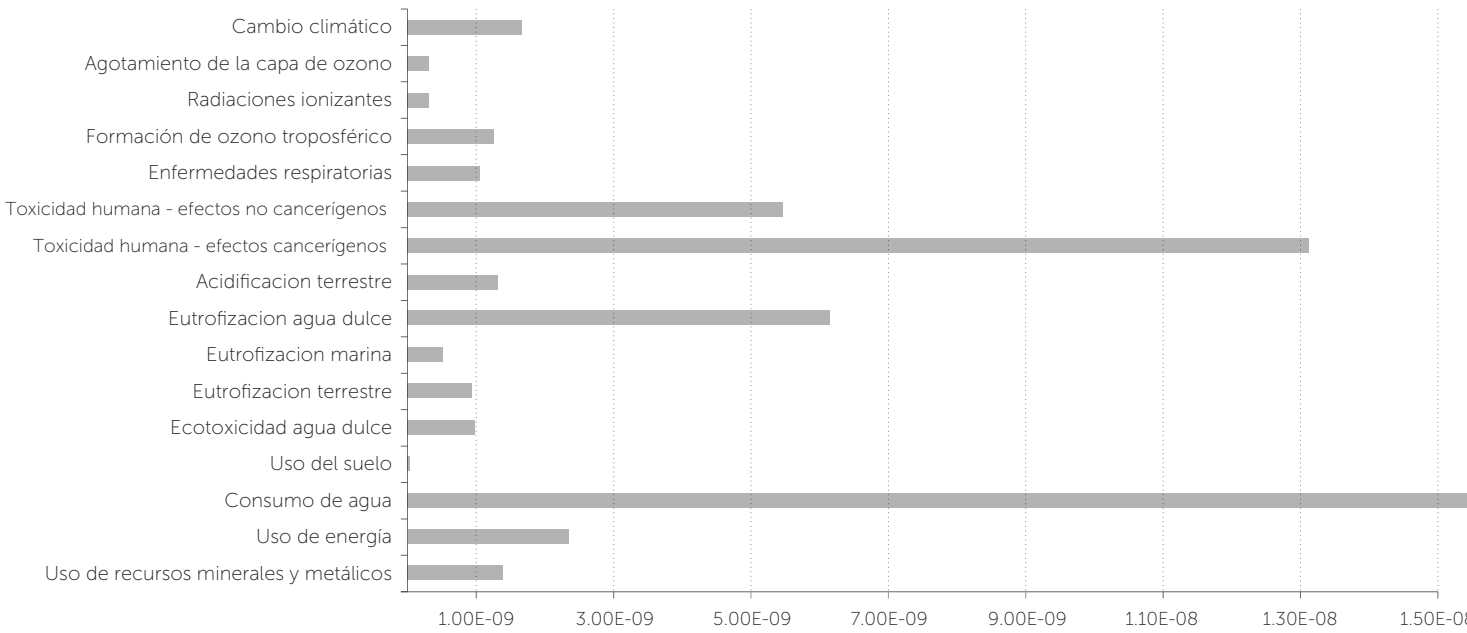


Figura 12. Resultados normalizados de impactos de la fase de construcción del edificio

Estos impactos se reparten entre las distintas fases de construcción del edificio según se muestra en la Figura 13.

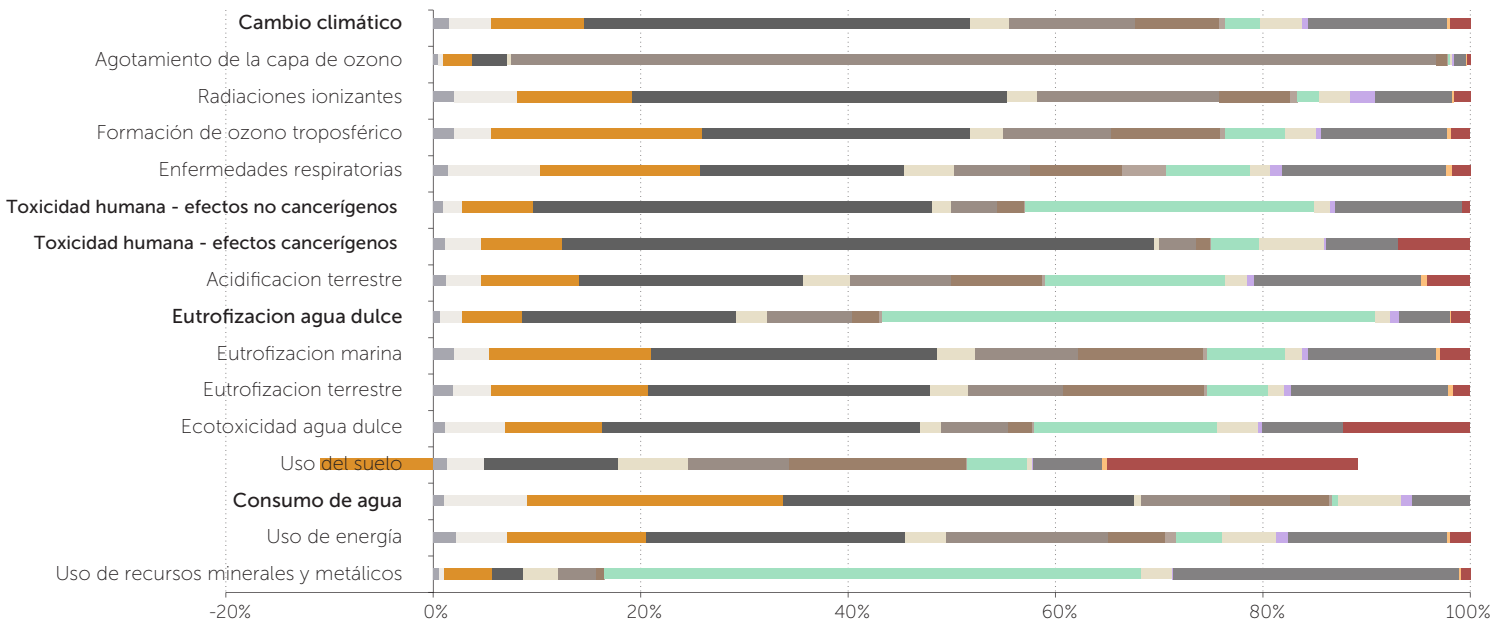
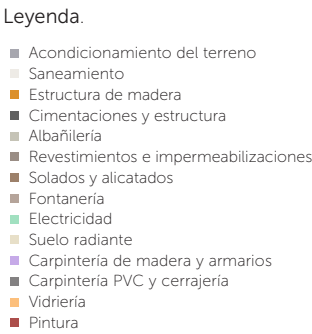


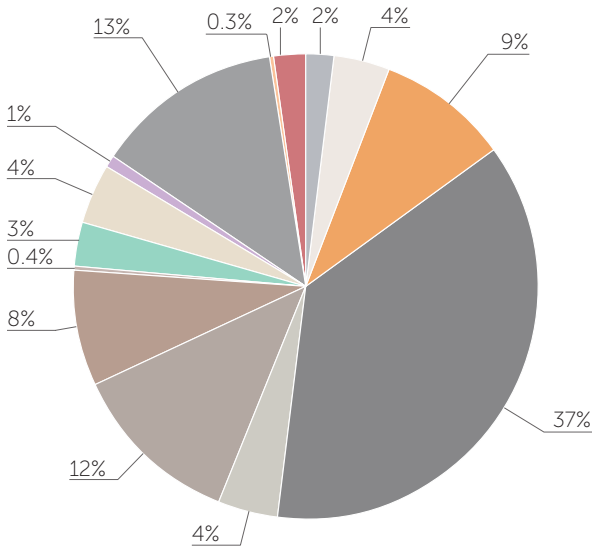
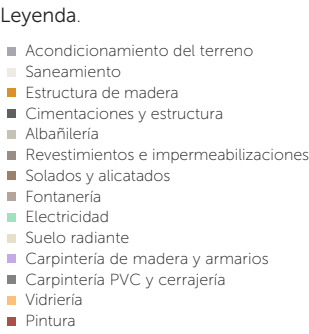
Figura 13. Reparto porcentual de la evaluación de impacto por fase de la construcción del edificio



IMPACTOS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO

Los resultados de la categoría de impacto de Cambio climático de la etapa de construcción del edificio se muestran en la Figura 14. El total de emisiones de gases de efecto invernadero se ha cuantificado en 390 kg CO₂eq/m².

Figura 14. Reparto porcentual de la evaluación de impacto de la categoría de cambio climático por fase de la construcción del edificio



El 37% de los impactos son producidos por las cimentaciones y la estructura del edificio con 145 kg CO₂eq/m² de los cuales el 73% son debidos al hormigón y el 23% al acero de las armaduras (ver Figura 14).

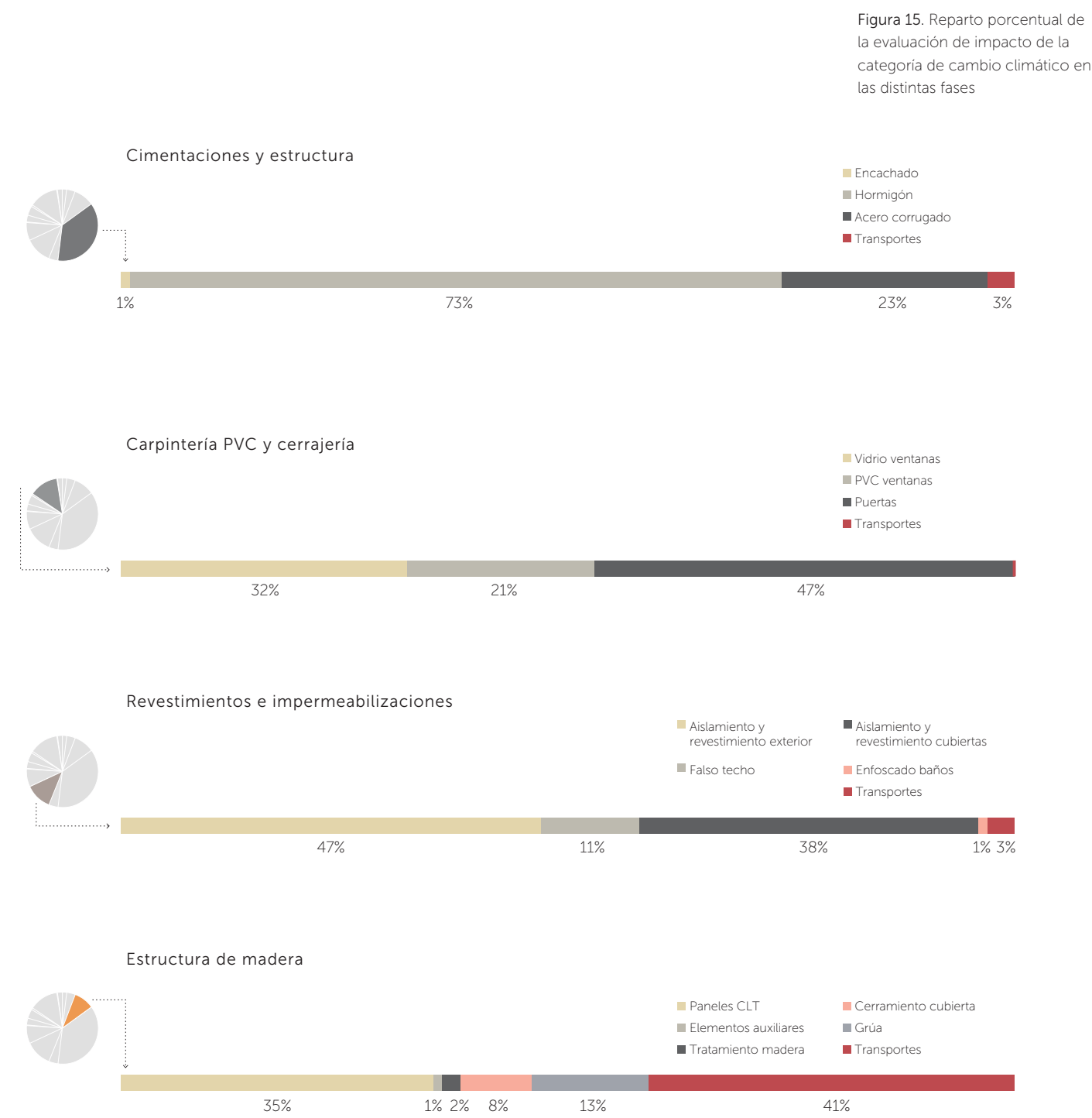
El 13% de los impactos son debidos a la carpintería de PVC y cerrajería con 52 kg CO₂eq/m² de los cuales el 47% son debidos a las puertas de acero, el 32% al vidrio de las ventanas y el 21% al PVC de las ventanas (ver Figura 14).

El 12% de los impactos son debidos a los revestimientos e impermeabilizaciones con 47 kg CO₂eq/m² de los cuales el 47% son debidos al aislamiento y revestimiento exterior y el 38% al aislamiento y revestimiento de cubiertas (ver Figura 11). El aislamiento y revestimiento exterior consiste en un sistema SATE de 10 cm o 20 cm de espesor. La contribución relativa de los componentes principales se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 27. Contribución relativa al impacto sobre el cambio climático de los componentes principales del sistema SATE

Sistema SATE	Mortero	EPS	Imprimación y revestimiento acrílico
COTETERM 10	69%	17%	10%
COTETERM 20	59%	30%	9%

El 9% de los impactos sobre el cambio climático son debidos a la estructura de madera que aporta 35 kg CO₂eq/m². De estas emisiones el 41% son debidas a los transportes, el 35% a la fabricación de los paneles CLT, el 13% al consumo energético de la grúa de montaje y el 8% al cerramiento de la cubierta (ver Figura 15).



La etapa que sigue en importancia es la de solados y alicatados con un 8% de contribución a los impactos y 32 kg CO₂eq/m². El 52% de estos impactos es debido al recredido de hormigón y el 39% a la piedra utilizada para chapados y solados. Un 3% de los impactos son debidos a la instalación de rodapié de chapa de aluminio.

Otras fases importantes de la construcción el edificio en cuanto a su contribución a la categoría de cambio climático son los saneamientos (4%), albañilería (4%) y suelo radiante (4%). El resto de las fases tienen un impacto más marginal en los resultados.

Es necesario tener en cuenta que la estructura del edificio a base de paneles de madera CLT inmoviliza una cantidad importante de las emisiones de gases de efecto invernadero. Esto es debido a que la madera en su crecimiento capta CO₂ de la atmosfera para la formación de los compuestos orgánicos que conforman sus tejidos mediante el proceso de fotosíntesis. Este CO₂ se encuentra inmovilizado en la estructura del edificio durante los 50 años de vida útil del mismo y, posteriormente, al reciclarse esta madera para producir paneles OBS como se ha visto en la sección anterior. La cantidad de CO₂ inmovilizada en la madera se ha estimado en **142 kg CO₂eq/m²**.

IMPACTOS SOBRE EL USO DEL AGUA

Los resultados de la categoría de uso de agua de la etapa de construcción del edificio se muestran en la Figura 16. El total de impacto se ha cuantificado en 37 dam³eq/m².

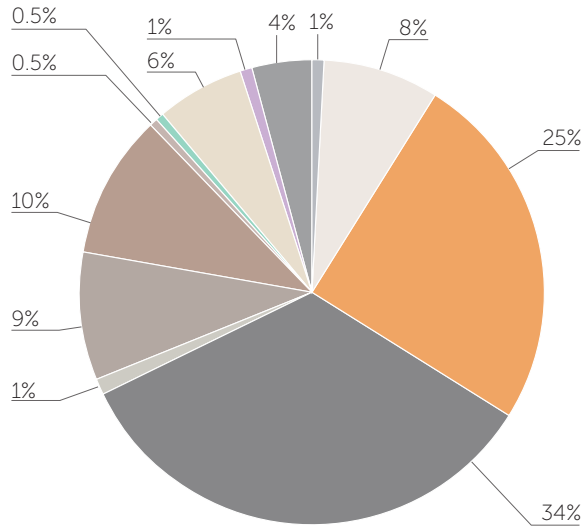


Figura 16. Reparto porcentual de la evaluación de impacto de la categoría de uso de agua por fase de la construcción del edificio

- Legenda.
- Acondicionamiento del terreno
 - Saneamiento
 - Estructura de madera
 - Cimentaciones y estructura
 - Albañilería
 - Revestimientos e impermeabilizaciones
 - Suelos y alicatados
 - Fontanería
 - Electricidad
 - Suelo radiante
 - Carpintería de madera y armarios
 - Carpintería PVC y cerrajería
 - Vidriería
 - Pintura

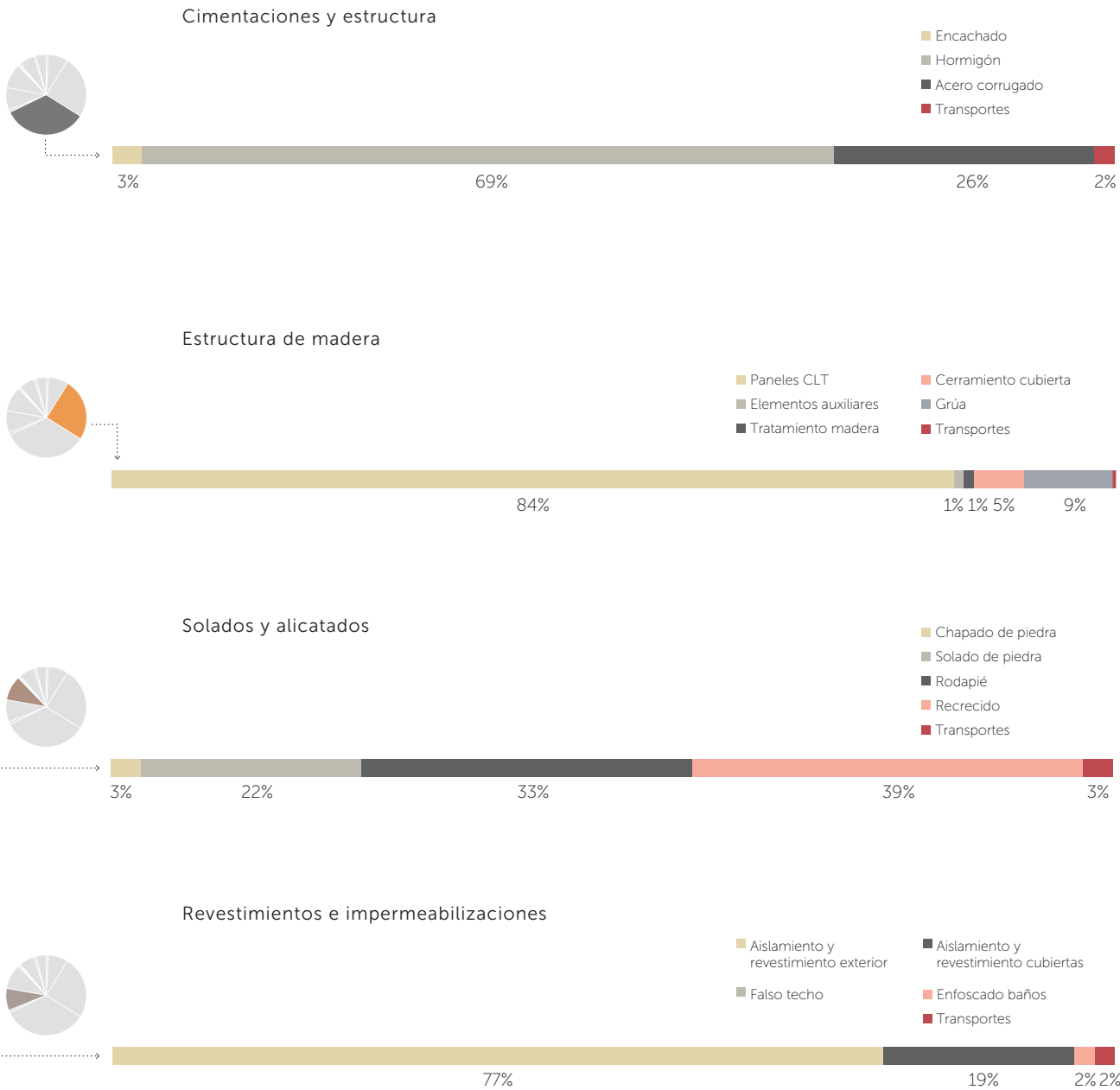
El 34% de los impactos son debidos a las cimentaciones y estructura con 12 dam³eq/m² de los cuales el 69% son debidos al hormigón y el 26% al acero de las armaduras (ver Figura 17).

El 25% de los impactos son producidos por la estructura de madera con 9 dam³eq/m² de los cuales el 84% son debidos los paneles CLT (ver Figura 17). El consumo de agua en la producción de paneles CLT es debido en un 89% al consumo de agua en la producción de la madera y en un 7% a la generación de la electricidad necesaria en el proceso.

El siguiente aspecto en importancia son los solados y alicatados con un 10% de contribución a los impactos y 3.5 dam³eq/m². El 39% de estos impactos es debido al recrecido de hormigón, el 33% a la instalación de rodapié de chapa de aluminio (ver Figura 17) y el 25% a los solados y chapados de piedra.

El 9% de los impactos sobre el uso de agua son debidos a los revestimientos e impermeabilizaciones que aportan 3.1 dam³eq/m². De estos consumos el 77% son debidos al aislamiento y revestimiento exterior y el 19% al aislamiento y revestimiento de las cubiertas (ver Figura 17).

Figura 17. Reparto porcentual de la evaluación de impacto de la categoría de uso de agua en las distintas fases



Otras fases importantes de la construcción el edificio en cuanto a su contribución a la categoría de consumo de agua son los saneamientos (8%) y la instalación de suelo radiante (7%). El resto de las fases tienen un impacto marginal en los resultados.

TOXICIDAD HUMANA - EFECTOS CANCERÍGENOS

Los resultados de la categoría de toxicidad humana - efectos cancerígenos de la etapa de construcción del edificio se muestran en la Figura 18. El total de impacto se ha cuantificado en 1.41e-5 CTU_h/m².

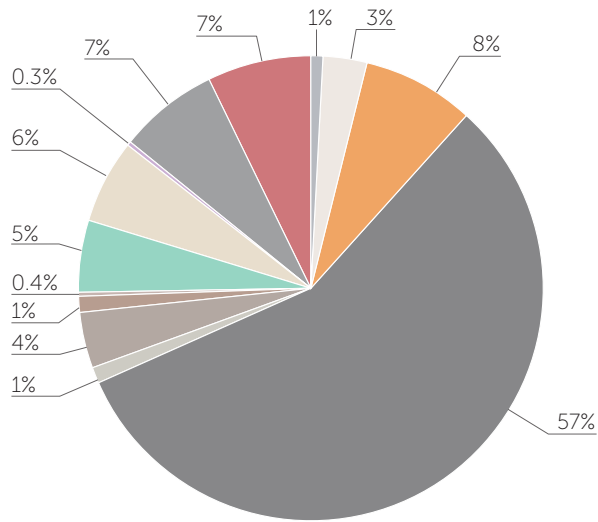


Figura 18. Reparto porcentual de la evaluación de impacto sobre toxicidad humana – efectos cancerígenos por fase de la construcción del edificio

- Leyenda.**
- Acondicionamiento del terreno
 - Saneamiento
 - Estructura de madera
 - Cimentaciones y estructura
 - Albañilería
 - Revestimientos e impermeabilizaciones
 - Solados y alicatados
 - Fontanería
 - Electricidad
 - Suelo radiante
 - Carpintería de madera y armarios
 - Carpintería PVC y cerrajería
 - Vidriería
 - Pintura

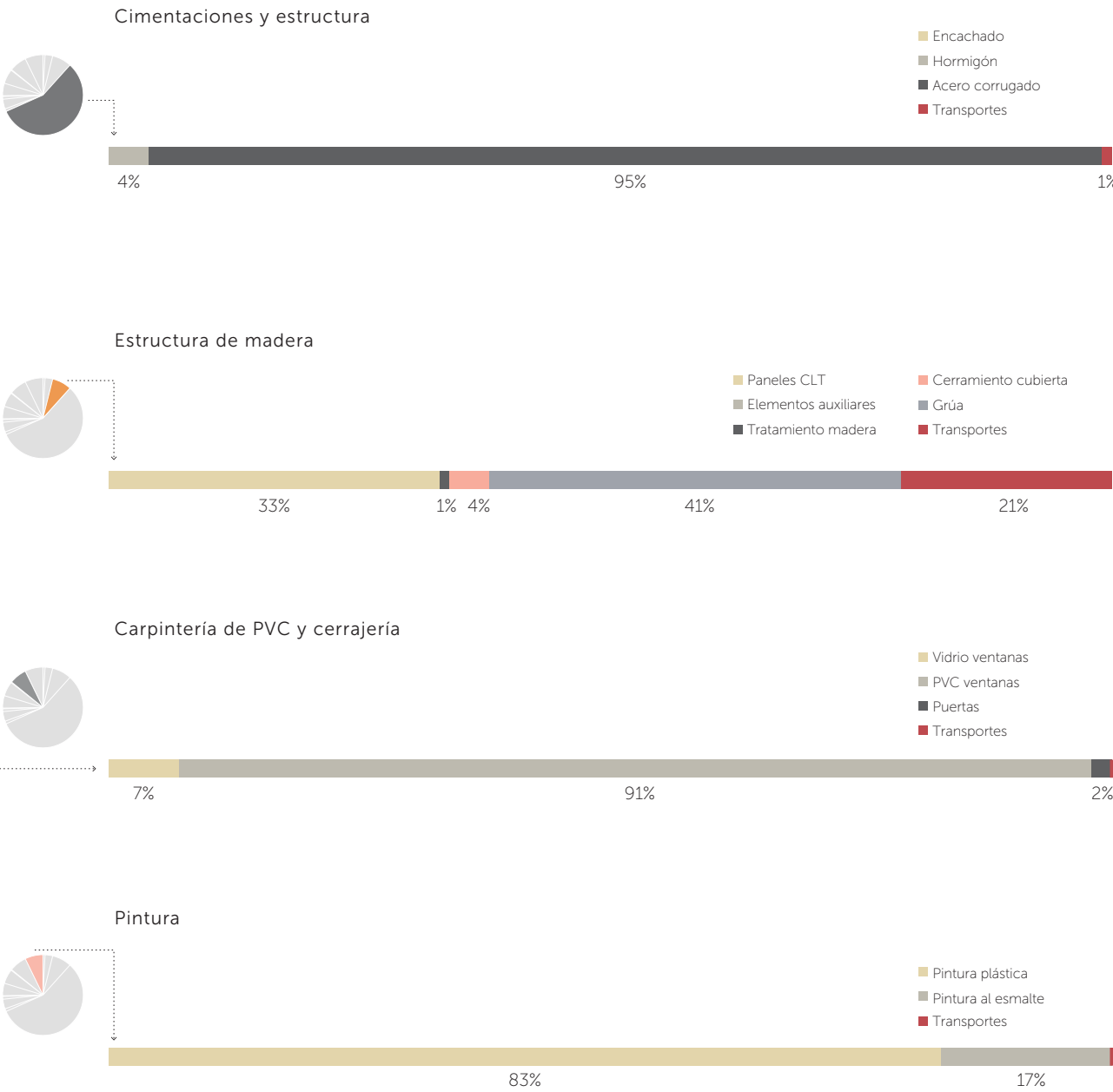
El 57% de los impactos son producidos por las cimentaciones y la estructura del edificio con 8e-6 CTU_h/m² de los cuales el 95% son debidos al acero de las armaduras y el 4% al hormigón (ver Figura 19).

El 8% de los impactos son debidos a la estructura de madera con 1e-6 CTU_h/m² de los cuales el 41% son debidos al consumo energético de la grúa de montaje, un 33% debido a los paneles CLT y el 21% a los transportes (ver Figura 19).

Un 7% de los impactos sobre la incidencia de cáncer son debidos a la carpintería de PVC y cerrajería con 9,8e-7 CTU_h/m². Otro 7% de los impactos se deben a la fase de pintura con 1e-6 CTU_h/m² (ver Figura 19).

Un 6% de los impactos sobre la incidencia de cáncer son debidos a la instalación de suelo radiante con 9e-7 CTU_h/m² y dentro de ella casi la totalidad de los impactos se deben al acero del depósito.

Figura 19. Reparto porcentual de la evaluación de impacto sobre toxicidad humana efectos cancerígenos en las distintas fases



Otras fases importantes de la construcción del edificio en cuanto a su contribución a la categoría de toxicidad humana efectos cancerígenos son la instalación de electricidad (5%), los revestimientos e impermeabilizaciones (4%) y los saneamientos (4%). El resto de las fases tienen un impacto marginal en los resultados.

TOXICIDAD HUMANA - EFECTOS NO CANCERÍGENOS

Los resultados de la categoría de toxicidad humana efectos no cancerígenos de la etapa de construcción del edificio se muestran en la Figura 20. El total de impacto se ha cuantificado en 7,2e-5 CTU_h/m².

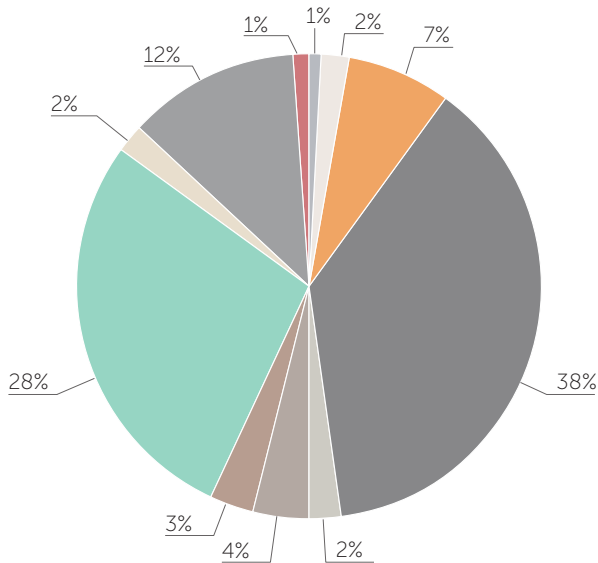


Figura 20. Reparto porcentual de la evaluación de impacto sobre toxicidad humana - efectos no cancerígenos por fase de la construcción del edificio

Legenda.

- Acondicionamiento del terreno
- Saneamiento
- Estructura de madera
- Cimentaciones y estructura
- Albañilería
- Revestimientos e impermeabilizaciones
- Solados y alicatados
- Fontanería
- Electricidad
- Suelo radiante
- Carpintería de madera y armarios
- Carpintería PVC y cerrajería
- Vidriería
- Pintura

El 38% de los impactos son producidos por las cimentaciones y la estructura del edificio con 3e-5 CTU_h/m² de los cuales el 81% son debidos al acero de las armaduras y el 18% al hormigón (ver Figura 21).

El 28% de los impactos son debidos a la instalación eléctrica con 2e-5 CTU_h/m² de los cuales el 82% es debido a los cables, el 12% a la toma de tierra y el 5% al PVC (ver Figura 21).

El 7% de los impactos es debido a la estructura de madera con 5e-6 CTU_h/m² de los cuales el 36% es debido a los paneles CLT, el 25% a los transportes, el 21% es debido al consumo energético de la grúa de montaje y el 11% a cerramiento de las cubiertas (ver Figura 21).

El 4% de los impactos es debido a los revestimientos e impermeabilizaciones con 3e-6 CTU_h/m² de los cuales el 66% es debido al aislamiento y revestimiento exterior, el 17% debido al falso techo y el 13% debido al aislamiento y revestimiento de cubiertas (ver Figura 21).

Figura 21. Reparto porcentual de la evaluación de impacto sobre toxicidad humana - efectos no cancerígenos en las distintas fases



Otras fases importantes de la construcción del edificio en cuanto a su contribución a la categoría de toxicidad humana efectos no cancerígenos son los solados y alicatados (3%). El resto de las fases tienen un impacto marginal en los resultados.

EUTROFIZACIÓN AGUA DULCE

Los resultados de la categoría de eutrofización de agua dulce de la etapa de construcción del edificio se muestran en la Figura 22. El total de impacto se ha cuantificado en 0,13 kg P_{eq}/m².

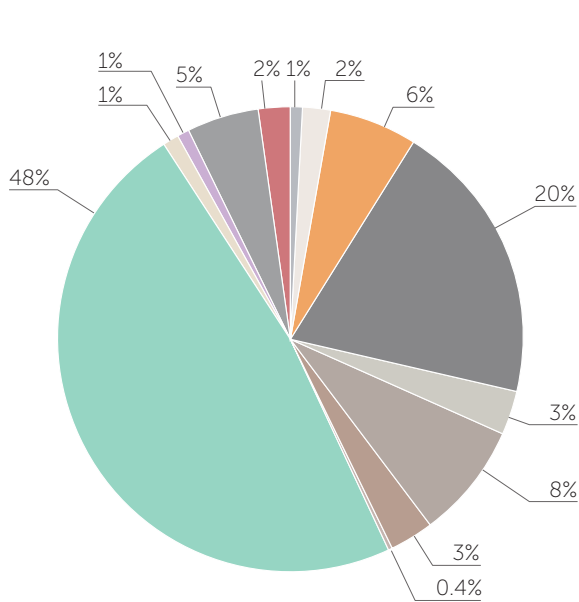


Figura 22. Reparto porcentual de la evaluación de impacto sobre eutrofización de agua dulce por fase de la construcción del edificio

- Legenda.
- Acondicionamiento del terreno
 - Saneamiento
 - Estructura de madera
 - Cimentaciones y estructura
 - Albañilería
 - Revestimientos e impermeabilizaciones
 - Solados y alicatados
 - Fontanería
 - Electricidad
 - Suelo radiante
 - Carpintería de madera y armarios
 - Carpintería PVC y cerrajería
 - Vidriería
 - Pintura

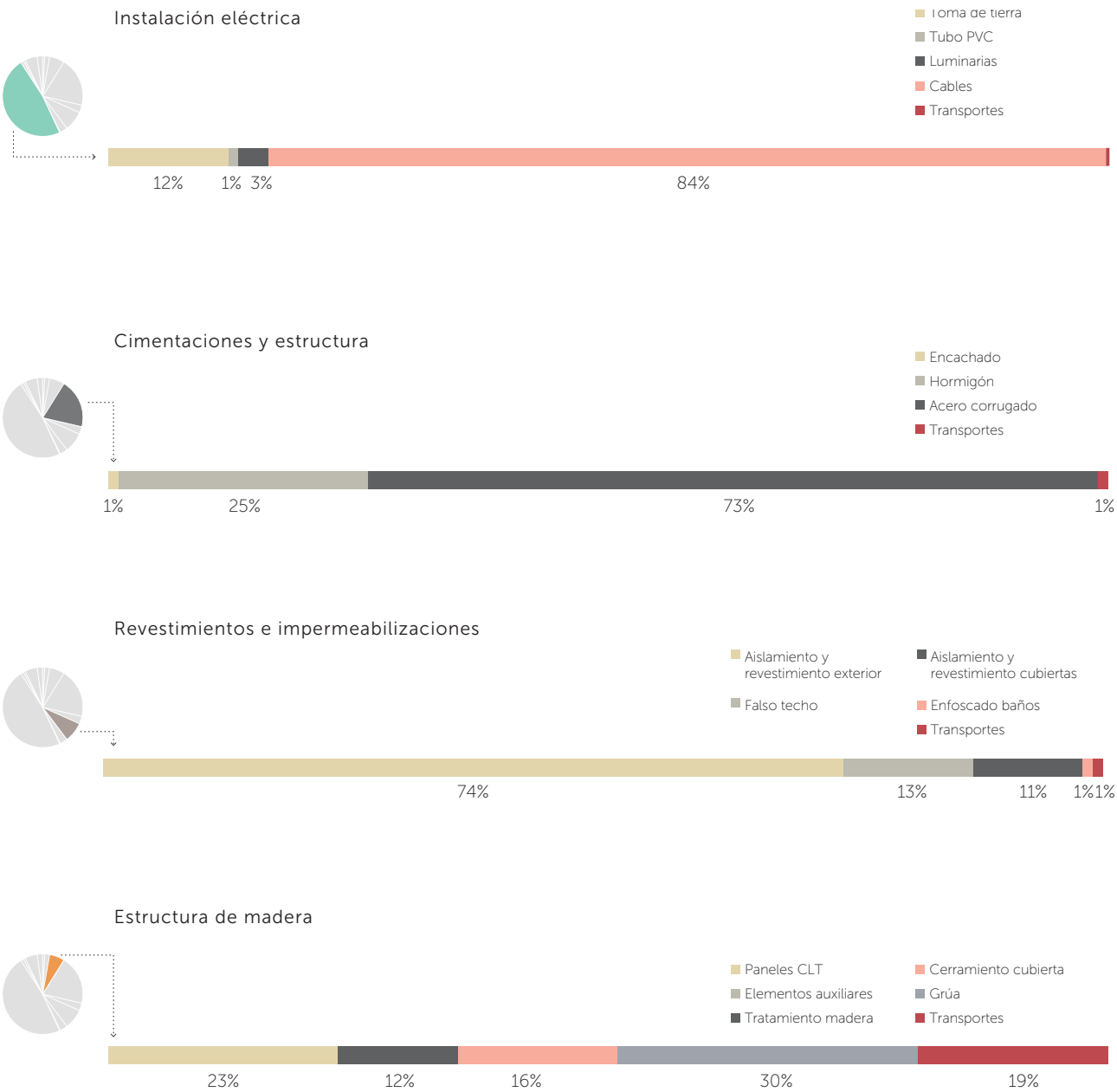
El 48% de los impactos son producidos por la instalación de electricidad que produce 0,06 kg P_{eq}/m² de los cuales el 84% son debidos a los cables y el 12% a la toma de tierra (ver Figura 23).

El 20% de los impactos son debidos a las cimentaciones y estructura con 0,03 kg P_{eq}/m² de los cuales el 73% son debidos al acero de las armaduras y el 25% al hormigón (ver Figura 23).

El 8% de los impactos es debido a los revestimientos e impermeabilizaciones con 0,01 kg P_{eq}/m² de los cuales el 74% es debido al aislamiento y revestimiento exterior, el 13% debido al falso techo y el 11% debido al aislamiento y revestimiento de cubiertas (ver Figura 23).

El 6% de los impactos es debido a la estructura de madera con 7e-3 kg P_{eq}/m² de los cuales el 30% son debidos a la grúa de montaje, el 23% a los paneles CLT y el 19% a los transportes (ver Figura 23).

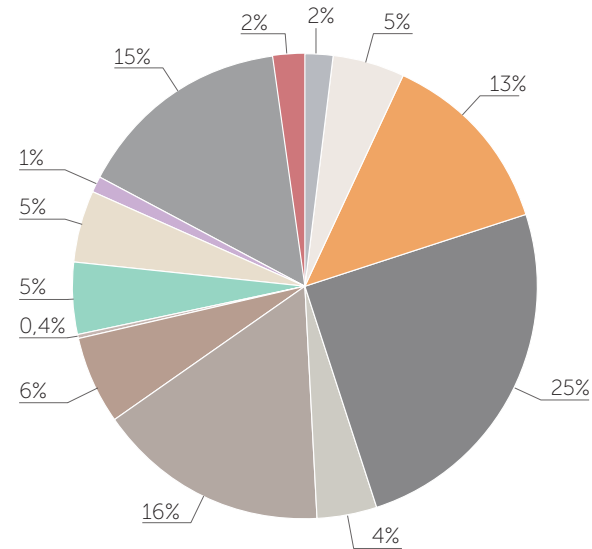
Figura 23. Reparto porcentual de la evaluación de impacto eutrofización de agua dulce en las distintas fases



Otra fase importante de la construcción del edificio en cuanto a su contribución a la categoría de eutrofización de agua dulce es la carpintería de PVC y cerrajería (5%). El resto de las fases tienen un impacto marginal en los resultados.

CONSUMO DE ENERGÍA FÓSIL

Los resultados de la categoría de consumo de energía fósil de la etapa de construcción del edificio se muestran en la Figura 24. El total de impacto se ha cuantificado en 4264 MJ/m².



El 25% del consumo de energía fósil es debido a las cimentaciones y la estructura del edificio con un consumo de 1067 MJ/m² de los cuales el 48% son debidos al hormigón y el 43% al acero de las armaduras (ver Figura 25).

El 16% de la energía fósil consumida en la construcción de la vivienda se produce en los revestimientos e impermeabilizaciones con 667 MJ/m² de los cuales el 65% son debidos al aislamiento y revestimiento exterior, el 24% al aislamiento y revestimiento de cubiertas y el 8% al falso techo (ver Figura 25).

El 15% del consumo de energía fósil en la construcción del edificio es debido a la carpintería de PVC y cerrajería con 652 MJ/m² de los cuales un 37% corresponden a las puertas de acero, un 35% al PVC de las ventanas y un 28% al vldrio de las ventanas.

La siguiente etapa en importancia es la estructura de madera que tiene un consumo de 571 MJ/m² de los cuales un 40% son consumidos en los transportes, un 33% en la producción de los paneles CLT, un 12% en el cerramiento de la cubierta y otro 12% en la energía consumida por la grúa de montaje.

Figura 25. Reparto porcentual de la evaluación de impacto sobre consumo de energía fósil en las distintas fases



Otras etapas importantes que contribuyen al impacto de consumo de energía fósil en la fase de construcción del edificio son los solados y alicatados, la instalación de suelo radiante, los saneamientos y la instalación de electricidad. El resto de las etapas tienen un impacto marginal en los resultados.

6.2. IMPACTOS DE LA ETAPA DE USO DEL EDIFICIO

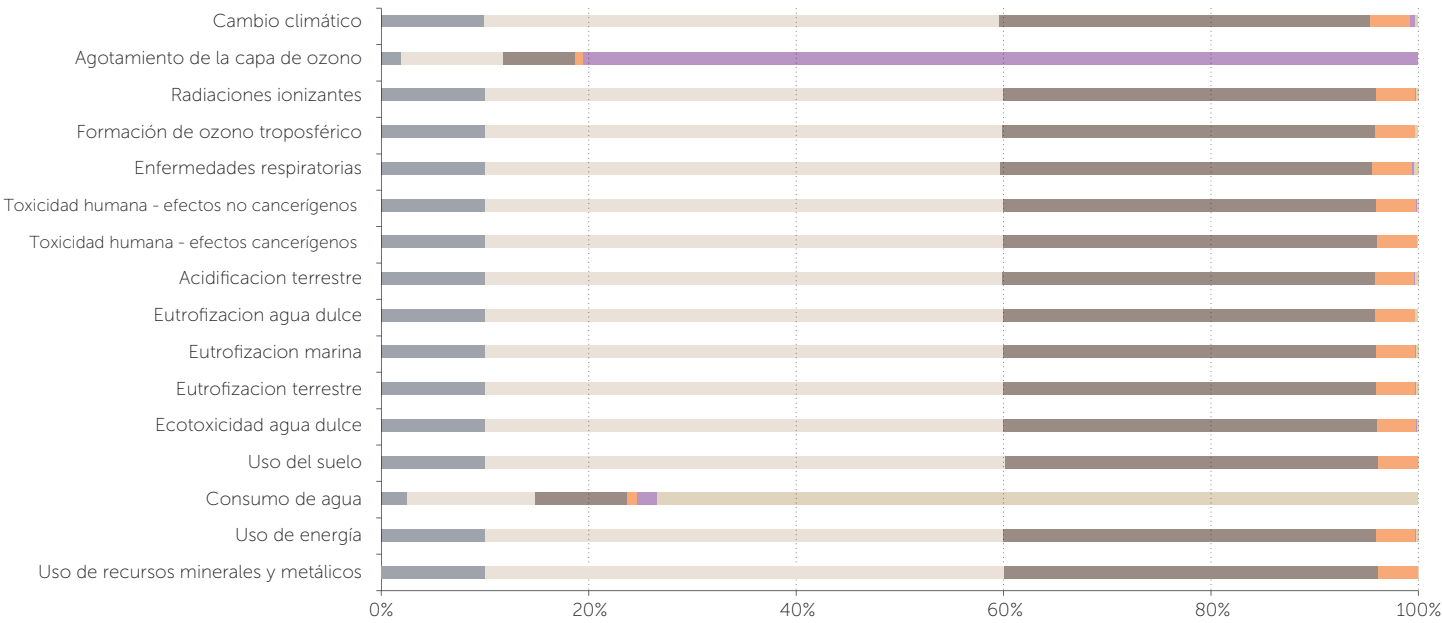
Los resultados de la evaluación de impactos de la etapa de uso del edificio durante 50 años se resumen en la siguiente tabla.

Impacto	Indicador	Total	Total/m²	Total/año	Total/m² y año
Cambio climático	kg CO ₂ eq	298508,57	1208,54	5970,17	24,17
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC11 eq	0,15	6,24E-04	3,08E-03	1,25E-05
Radiaciones ionizantes	kBq U-235 eq	184148,56	745,54	3682,97	14,91
Formación de ozono troposférico	kg NMVOC eq	1168,77	4,73	23,38	0,09
Enfermedades respiratorias	disease inc.	0,01	2,96E-05	1,46E-04	5,92E-07
Toxicidad humana - efectos no cancerígenos	CTU _h	0,04	1,64E-04	8,09E-04	3,28E-06
Toxicidad humana - efectos cancerígenos	CTU _h	0,005	1,88E-05	9,28E-05	3,76E-07
Acidificación terrestre	mol H+ eq	2820,36	11,42	56,41	0,23
Eutrofización agua dulce	kg P _{eq}	137,78	0,56	2,76	0,01
Eutrofización agua marina	kg N _{eq}	423,03	1,71	8,46	0,03
Eutrofización terrestre	mol N _{eq}	4686,67	18,97	93,73	0,38
Ecotoxicidad agua dulce	CTU _e	131430,37	532,11	2628,61	10,64
Uso del suelo	Pt	2276767,59	9217,68	45535,35	184,35
Consumo del agua	m3 depriv.	664496,11	2690,27	13289,92	53,81
Uso de energía	MJ	6315422,57	25568,51	126308,45	511,37
Uso de recursos minerales y metálicos	kg Sb _{eq}	0,57	2,32E-03	1,14E-02	4,63E-05

Tabla 28. Resultados de la evaluación de impactos de la etapa de uso del edificio

La Figura 26 muestra la contribución porcentual de cada aspecto del uso de edificio a los distintos impactos. El perfil es muy similar en todos ellos debido a que todos los consumos energéticos del edificio son eléctricos. Los únicos impactos con una distribución diferente son el agotamiento de la capa de ozono y el de consumo de agua. Este último está dominado, como era de esperar, por el consumo directo en el uso del edificio, pero existe un 27% del impacto sobre el consumo de agua asociado a los consumos indirectos de la producción de la electricidad consumida en el edificio.

Los mayores impactos son los debidos a la calefacción del edificio seguido de los consumos en refrigeración y en ACS. Los consumos en iluminación suponen un 6-7% de todos los impactos.



Leyenda.

- Producción ACS
- Calefacción
- Refrigeración
- Iluminación
- Pérdidas de fluido refrigerante
- Consumo de agua

Figura 26. Reparto porcentual de la evaluación de impacto del uso del edificio

6.3. IMPACTOS DE LA ETAPA DE MANTENIMIENTO DEL EDIFICIO

Los resultados de la evaluación de impactos de la etapa de mantenimiento del edificio durante 50 años se resumen en la siguiente tabla.

Impacto	Indicador	Total	Total/m²	Total/año	Total/m² y año
Cambio climático	kg CO ₂ eq	28642,60	115,96	572,85	2,32
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC11 eq	0,04	1,82E-04	8,97E-04	3,63E-06
Radiaciones ionizantes	kBq U-235 eq	2195,39	8,89	43,91	0,18
Formación de ozono troposférico	kg NMVOC eq	103,11	0,42	2,06	0,01
Enfermedades respiratorias	disease inc.	1,66E-03	6,71E-06	3,31E-05	1,34E-07
Toxicidad humana - efectos no cancerígenos	CTU _h	4,28E-03	1,73E-05	8,55E-05	3,46E-07
Toxicidad humana - efectos cancerígenos	CTU _h	2,81E-03	1,14E-05	5,61E-05	2,27E-07
Acidificación terrestre	mol H+ eq	299,30	1,21	5,99	0,02
Eutrofización agua dulce	kg P _{eq}	11,63	0,05	0,23	9,42E-04
Eutrofización agua marina	kg N _{eq}	42,31	0,17	0,85	0,003
Eutrofización terrestre	mol N _{eq}	355,60	1,44	7,11	0,03
Ecotoxicidad agua dulce	CTU _e	110579,92	447,69	2211,60	8,95
Uso del suelo	Pt	944844,99	3825,28	18896,90	76,51
Consumo del agua	m3 depriv.	510546,78	2066,99	10210,94	41,34
Uso de energía	MJ	335218,16	1357,16	6704,36	27,14
Uso de recursos minerales y metálicos	kg Sb _{eq}	0,18	7,10E-04	3,51E-03	1,42E-05

Tabla 29. Resultados de la evaluación de impactos de la etapa de mantenimiento del edificio

La Figura 27 muestra la contribución porcentual de cada aspecto del mantenimiento del edificio a los distintos impactos. La mayoría de los impactos del mantenimiento del edificio son debidos a la pintura interior y exterior. El cambio de ventanas contribuye también de forma importante a la mayoría de los impactos. Y la sustitución de la bomba de calor impacta en el agotamiento de la capa de ozono, toxicidad humana, eutrofización de agua dulce y uso de recursos.

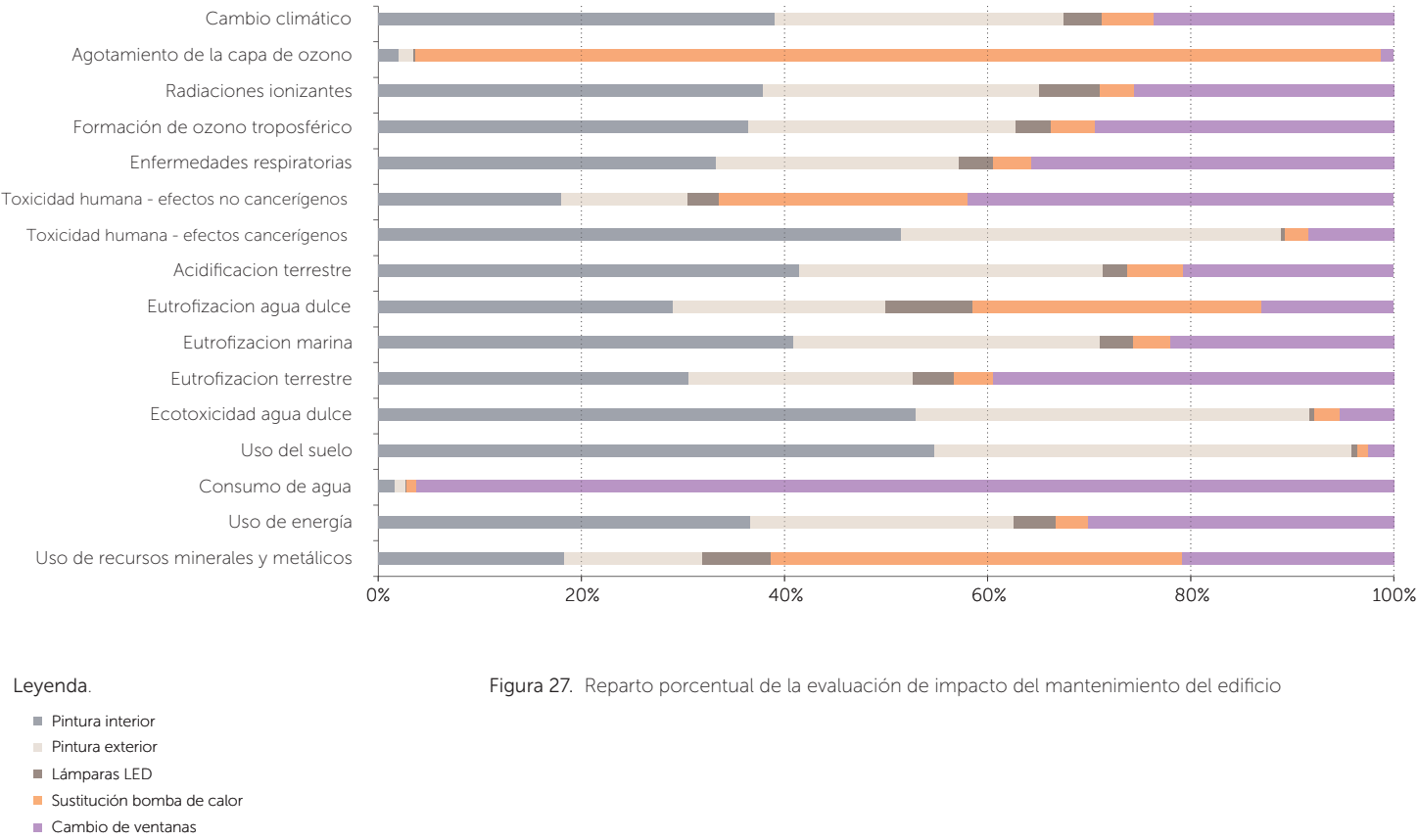


Figura 27. Reparto porcentual de la evaluación de impacto del mantenimiento del edificio

6.3. IMPACTOS DE LA ETAPA DE FIN DE VIDA DEL EDIFICIO

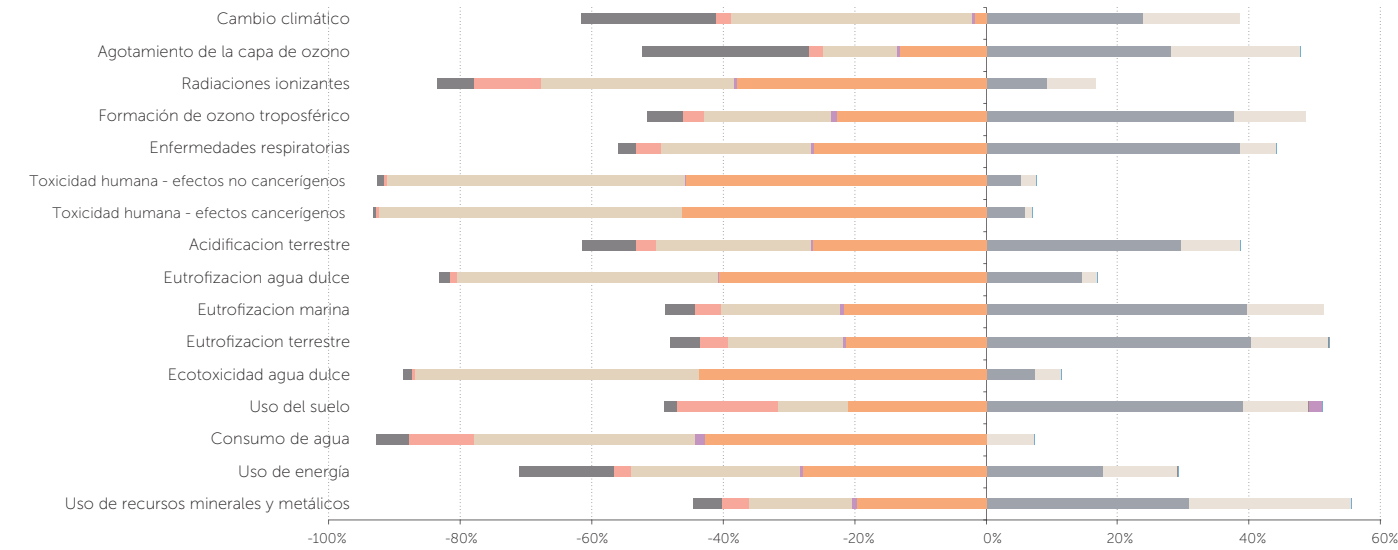
Los resultados de la evaluación de impactos de la etapa fin de vida del edificio se resumen en la siguiente tabla.

Impacto	Indicador	Total	Total/m²
Cambio climático	kg CO ₂ eq	-2600,06	-10,53
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC11 eq	0,0001	4,52E-07
Radiaciones ionizantes	kBq U-235 eq	-780,82	-3,16
Formación de ozono troposférico	kg NMVOC eq	11,58	0,05
Enfermedades respiratorias	disease inc.	1,28E-04	5,19E-07
Toxicidad humana - efectos no cancerígenos	CTU _h	-2,44E-03	-9,88E-06
Toxicidad humana - efectos cancerígenos	CTU _h	-8,31E-04	-3,36E-06
Acidificación terrestre	mol H+ eq	0,62	0,003
Eutrofización agua dulce	kg P _{eq}	-1,57	-0,01
Eutrofización agua marina	kg N _{eq}	3,96	0,02
Eutrofización terrestre	mol N _{eq}	44,56	0,18
Ecotoxicidad agua dulce	CTUe	-8605,60	-34,84
Uso del suelo	Pt	5188,39	21,01
Consumo del agua	m3 depriv.	-599887,38	-2428,69
Uso de energía	MJ	-35032,01	-141,83
Uso de recursos minerales y metálicos	kg Sb _{eq}	0,005	1,97E-05

Tabla 30. Resultados de la evaluación de impactos de la etapa de fin de vida del edificio.

La contribución relativa de cada uno de los aspectos considerados en el fin de vida de los materiales del edificio se muestra en la Figura 28.

Los impactos positivos son debidos a las demoliciones y a los transportes de los materiales a las instalaciones de reciclaje o a vertedero. Los impactos negativos son debidos a los impactos evitados (créditos) al reciclar y, por tanto, dejar de fabricar algunos de los materiales, especialmente el acero, así como por la valorización energética que se hace de una parte de la madera del edificio. En conjunto, esta tapa ofrece resultados negativos (efectos positivos sobre el medio ambiente) en las categorías de cambio climático, radiaciones ionizantes, toxicidad humana, eutrofización de agua dulce, ecotoxicidad de agua dulce, consumo de agua y uso de energía.



Leyenda:

- Demoliciones
- Transportes
- Reciclajes
- Créditos reciclaje hormigón
- Créditos reciclaje madera
- Créditos reciclaje acero
- Incineración
- Créditos reutilización grava
- Créditos valoración energética

Figura 28. Reparto porcentual de la evaluación de impacto de la fase fin de vida útil del edificio.

6.5. IMPACTOS TOTALES

Los resultados de la evaluación de impactos totales del edificio durante 50 años se resumen en la siguiente tabla.

Impacto	Indicador	Total	Total/m²	Total/año	Total/m² y año
Cambio climático	kg CO ₂ eq	420917,94	1704,12	8418,36	34,08
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC11 eq	0,25	1,01E-03	4,99E-03	2,02E-05
Radiaciones ionizantes	kBq U-235 eq	194402,37	787,05	3888,05	15,74
Formación de ozono troposférico	kg NMVOC eq	1634,58	6,62	32,69	0,13
Enfermedades respiratorias	disease inc.	0,01	5,79E-05	2,86E-04	1,16E-06
Toxicidad humana - efectos no cancerígenos	CTU _h	0,06	2,44E-04	1,20E-03	4,87E-06
Toxicidad humana - efectos cancerígenos	CTU _h	0,01	4,09E-05	2,02E-04	8,18E-07
Acidificación terrestre	mol H+ eq	3623,14	14,67	72,46	0,29
Eutrofización agua dulce	kg P _{eq}	178,93	0,72	3,58	0,01
Eutrofización agua marina	kg N _{eq}	570,49	2,31	11,41	0,05
Eutrofización terrestre	mol N _{eq}	6232,32	25,23	124,65	0,50
Ecotoxicidad agua dulce	CTUe	313374,72	1268,72	6267,49	25,37
Uso del suelo	Pt	3505628,64	14192,83	70112,57	283,86
Consumo del agua	m3 depriv.	9606600,41	38893,12	192132,01	777,86
Uso de energía	MJ	7668830,05	31047,89	153376,60	620,96
Uso de recursos minerales y metálicos	kg Sb _{eq}	1,36	0,006	0,03	1,10E-04

Tabla 31. Resultados de la evaluación de impactos totales del edificio

La Figura 29 muestra la contribución porcentual de cada aspecto del edificio a los distintos impactos. En general, el uso del edificio sigue siendo la etapa que tiene una mayor contribución a los impactos con excepción de las categorías de impacto de agotamiento de la capa de ozono, enfermedades respiratorias, toxicidad humana (cáncer), consumo de agua y uso de recursos minerales y metálicos.

Este estudio ha considerado que el mix de generación eléctrica se mantiene constante durante toda la vida útil del edificio. Sin embargo, la evolución esperada del mix de generación eléctrica es hacia una descarbonización completa para el año 2050 con una penetración de energías renovables del 100% (Ministerio para la Transición Ecológica, 2019). Esto traerá como consecuencia que la contribución de la etapa de uso del edificio pierda importancia relativa en gran parte de las categorías de impacto.

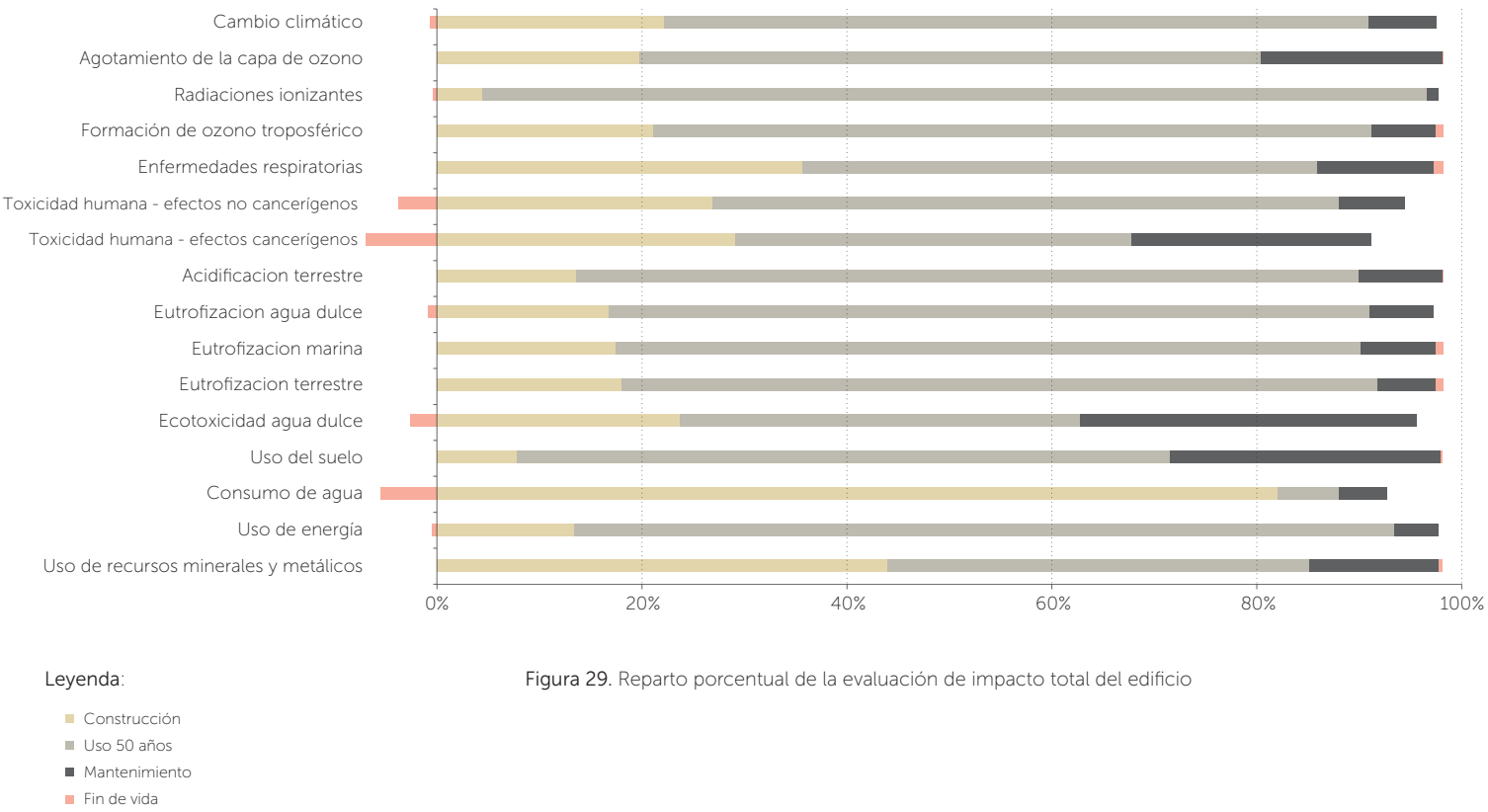


Figura 29. Reparto porcentual de la evaluación de impacto total del edificio

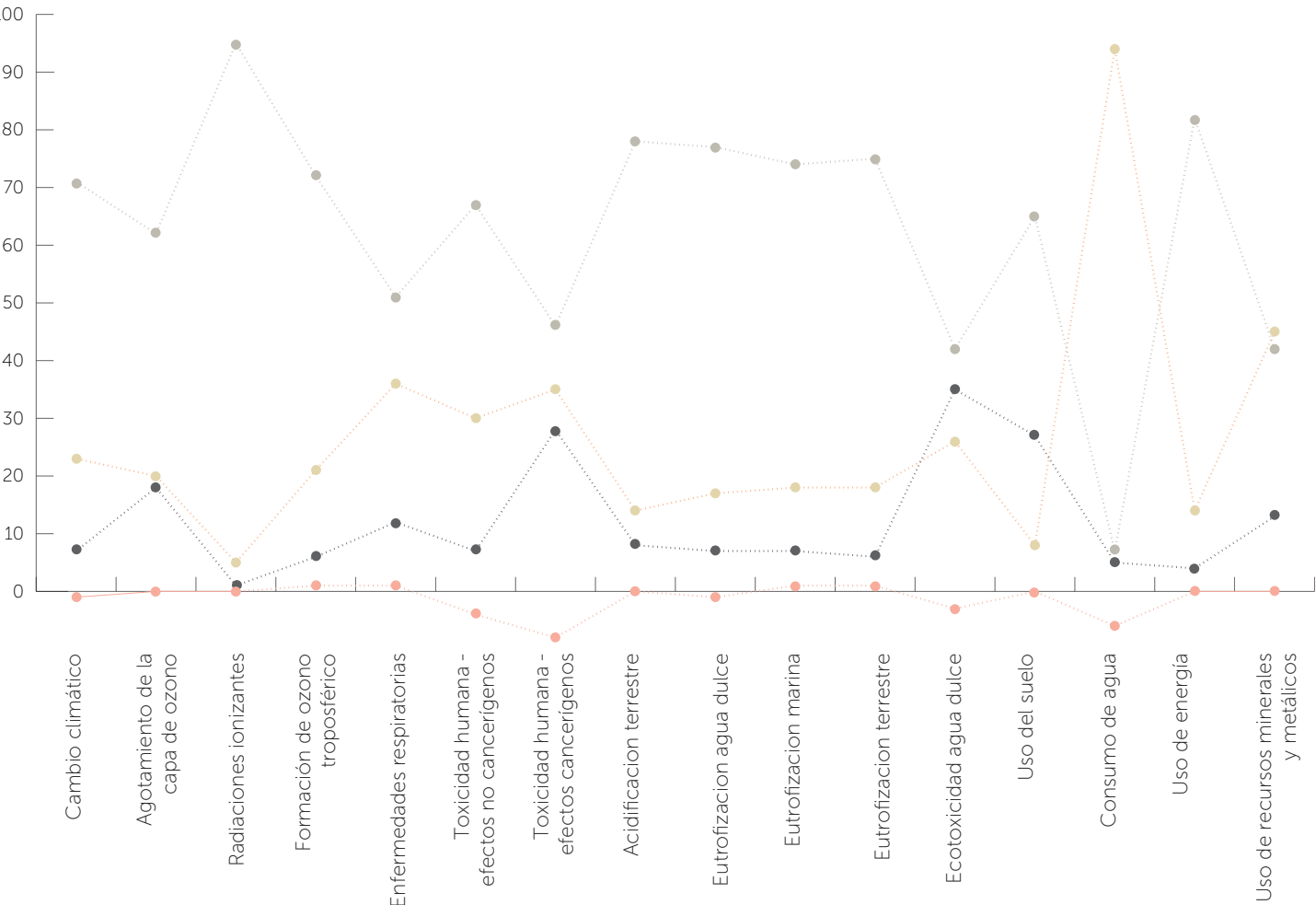


Figura 30. Evolución de los impactos evaluados en las fases de construcción, uso, mantenimiento y fin de vida del edificio

Legenda:

- Construcción
- Uso 50 años
- Mantenimiento
- Fin de vida

7. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA HUELLA AMBIENTAL DE VIVIENDA

La interpretación de los resultados del estudio de HAP persigue dos objetivos:

- El primero es garantizar que el comportamiento del modelo de HAP corresponda a los objetivos y a los requisitos de calidad del estudio;
- El segundo objetivo consiste en obtener del análisis conclusiones y recomendaciones sólidas para conseguir mejoras ambientales.

Para ello se han realizado los siguientes análisis:

- Identificación de los puntos críticos;
- Análisis de sensibilidad;
- Comparación con otros estudios;
- Conclusiones, limitaciones y recomendaciones.

7.1. IDENTIFICACIÓN DE PUNTOS CRÍTICOS

Una revisión sistemática de los resultados ha permitido identificar aquellos puntos críticos o aspectos que afectan más a los resultados de la HAP del edificio.

La Tabla 32 muestra sombreados los aspectos de la etapa de construcción del edificio que están dentro de los cuatro más importantes en cada categoría de impacto. Esta tabla permite identificar los aspectos más críticos en todas ellas. Estos aspectos son:

- **Cimentaciones y estructuras:** está dentro de los 4 impactos más importantes en 15 categorías de impacto.
- **Estructura de madera:** está dentro de los 4 impactos más importantes en 14 categorías de impacto.
- **Carpintería de PVC y cerrajería:** está dentro de los 4 impactos más importantes en 12 categoría de impacto.
- **Revestimientos e impermeabilizaciones:** está dentro de los 4 impactos más importantes en 9 categorías de impacto.
- **Solados y alicatados:** está dentro de los 4 impactos más importantes en 6 categorías de impacto.
- **Electricidad:** está dentro de los 4 impactos más importantes en 5 categorías de impacto.
- **Pintura:** está dentro de los 4 impactos más importantes en 3 categorías de impacto.

Tabla 32. Aspectos de la etapa de construcción del edificio que están dentro de los cuatro más importantes en cada categoría de impacto

Impacto	Acondicionamiento del terreno	Saneamiento	Estructura de madera	Cimentaciones y estructura	Albañilería	Revestimientos e impermeabilizaciones
Cambio climático	2%	4%	9%	37%	4%	12%
Agotamiento de la capa de ozono	1%	0%	3%	3%	0%	89%
Radiaciones ionizantes	2%	6%	11%	36%	3%	18%
Formación de ozono troposférico	2%	3%	20%	26%	3%	10%
Enfermedades respiratorias	1%	9%	15%	20%	5%	7%
Toxicidad humana - efectos no cancerígenos	1%	2%	7%	38%	2%	4%
Toxicidad humana - efectos cancerígenos	1%	3%	8%	57%	1%	4%
Acidificación terrestre	1%	3%	9%	22%	5%	10%
Eutrofización agua dulce	1%	2%	6%	21%	3%	8%
Eutrofización agua marina	2%	3%	16%	28%	4%	10%
Eutrofización terrestre	2%	4%	15%	27%	4%	9%
Ecotoxicidad agua dulce	1%	6%	9%	31%	2%	7%
Uso del suelo	2%	5%	-14%	17%	9%	12%
Consumo del agua	1%	8%	25%	34%	1%	9%
Uso de energía	2%	5%	13%	25%	4%	16%
Uso de recursos minerales y metálicos	1%	0%	5%	3%	3%	4%

Solados y alicatados	Fontanería	Electricidad	Suelo radiante	Carpintería de madera y armarios	Carpintería de PVC y cerrajería	Vidriería	Pintura
8%	1%	3%	4%	1%	13%	0%	2%
1%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	0%
7%	1%	2%	3%	2%	7%	0%	2%
11%	0%	6%	3%	1%	12%	0%	2%
9%	4%	8%	2%	1%	16%	1%	2%
3%	1%	28%	2%	0%	12%	0%	1%
1%	0%	5%	6%	0%	7%	0%	7%
9%	0%	17%	2%	1%	16%	1%	4%
3%	0%	48%	1%	1%	5%	0%	2%
12%	0%	8%	2%	1%	12%	0%	3%
14%	0%	6%	2%	1%	15%	0%	2%
2%	0%	18%	4%	0%	8%	0%	12%
22%	0%	7%	1%	0%	9%	1%	31%
10%	0%	1%	6%	1%	6%	0%	0%
5%	1%	5%	5%	1%	15%	0%	2%
1%	0%	52%	3%	0%	28%	0%	1%

Los impactos producidos por las cimentaciones y estructuras son debidos principalmente al hormigón para algunos impactos y al acero de las armaduras para otros. En el caso del hormigón, la mayor parte de los impactos se deben a la producción de cemento seguido de la producción de áridos.

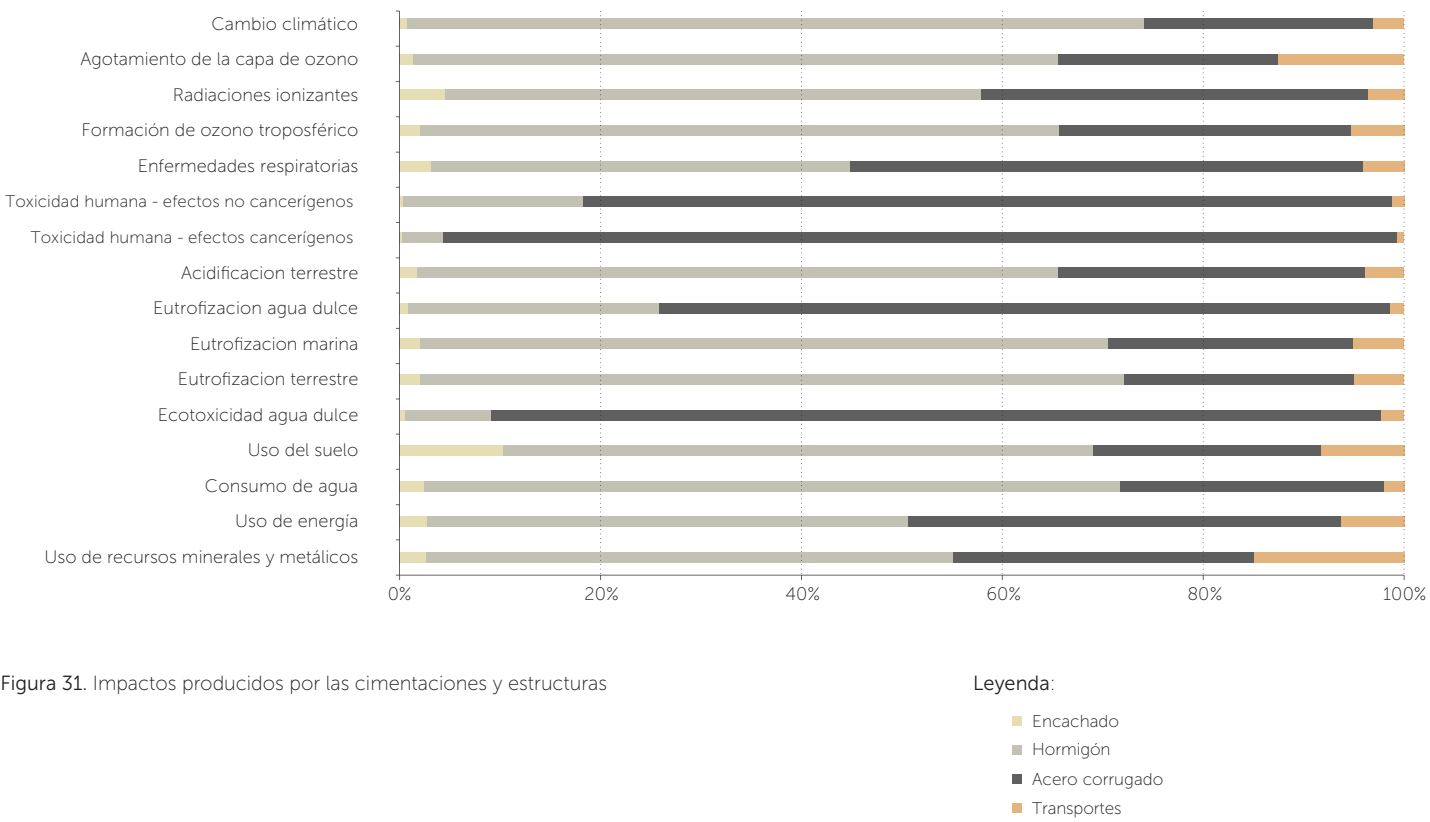


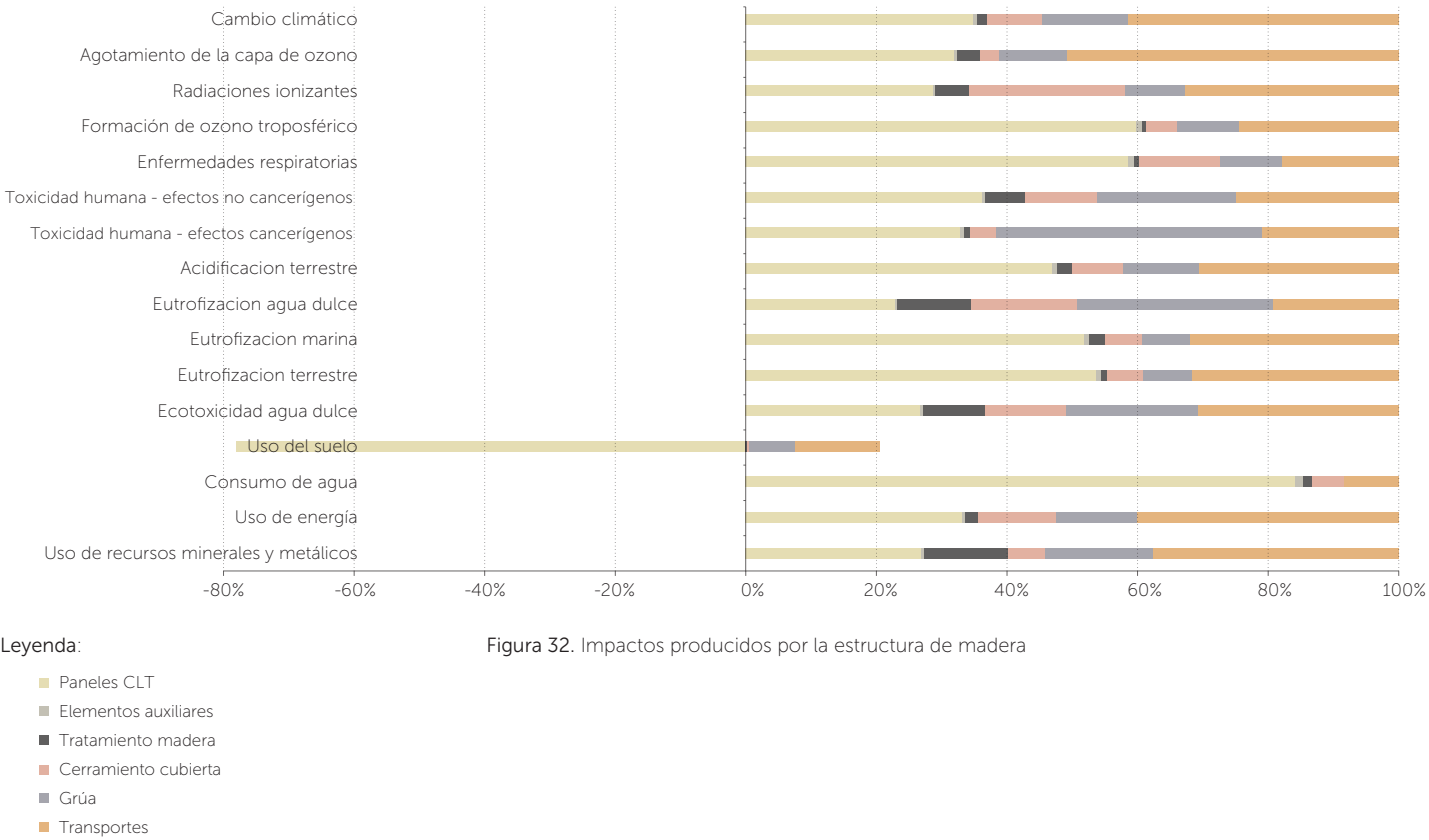
Figura 31. Impactos producidos por las cimentaciones y estructuras

Leyenda:

- Encachado
- Hormigón
- Acero corrugado
- Transportes

En el caso de la estructura de madera, los procesos de producción del CLT son los responsables de la mayor parte de los impactos, junto con el cerramiento de la cubierta, la grúa de montaje y los transportes. Dado que el proceso de producción de los paneles CLT está bastante optimizado, y la energía consumida por la grúa de montaje es la necesaria para el proceso de montaje, las posibilidades de mejora recaen fundamentalmente en la reducción de los impactos del transporte.

Es importante tener en cuenta que en el cómputo de los impactos sobre el cambio climático de la estructura de madera no tienen en cuenta la captación de CO₂ en el proceso de crecimiento de la misma que se han cuantificado en 142 kg CO₂eq/m².



Leyenda:

- Paneles CLT
- Elementos auxiliares
- Tratamiento madera
- Cerramiento cubierta
- Grúa
- Transportes

Figura 32. Impactos producidos por la estructura de madera

En cuanto a la carpintería de PVC y cerrajería, los procesos de fabricación del PVC de las ventanas contribuye de forma importante a la mayoría de los impactos.

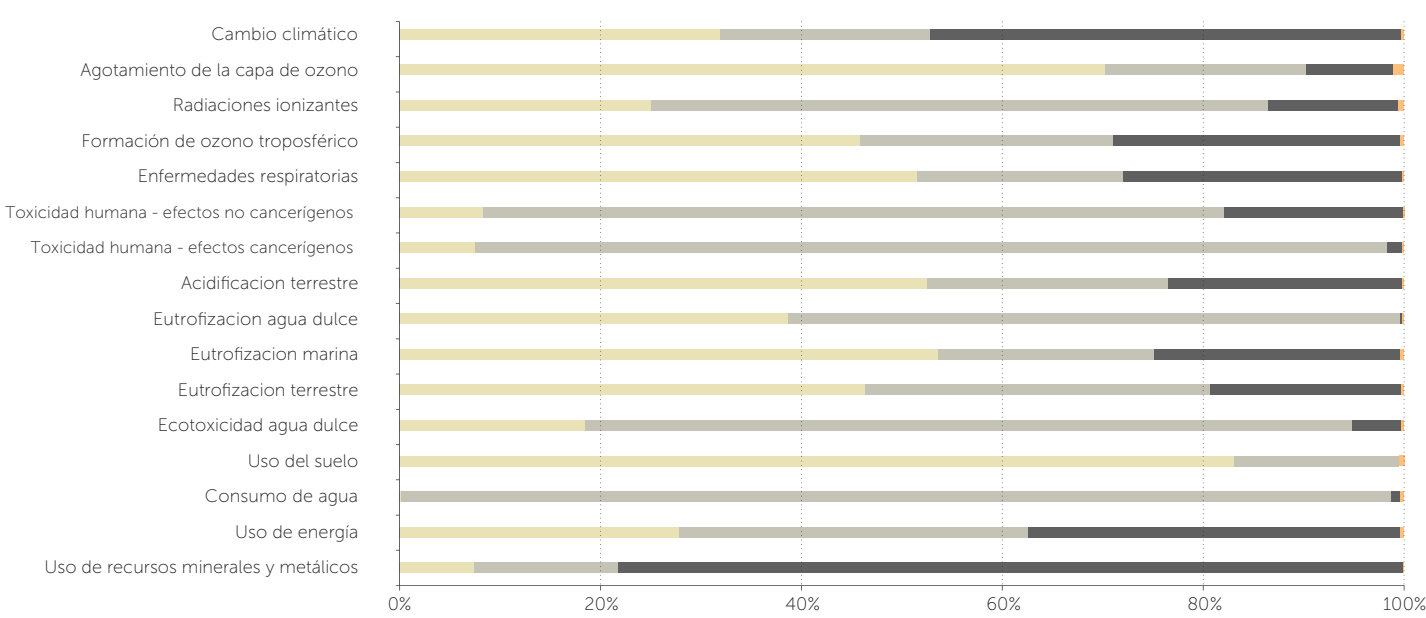


Figura 33. Impactos producidos por la carpintería de PVC y cerrajería

Leyenda:

- Vidrios ventanas
- PVC ventanas
- Puertas
- Transportes

En cuanto a los revestimientos e impermeabilizaciones, el sistema SATE de aislamiento y revestimiento exterior es la causa más importante de los impactos seguido del aislamiento de las cubiertas a base de poliestireno extruido.

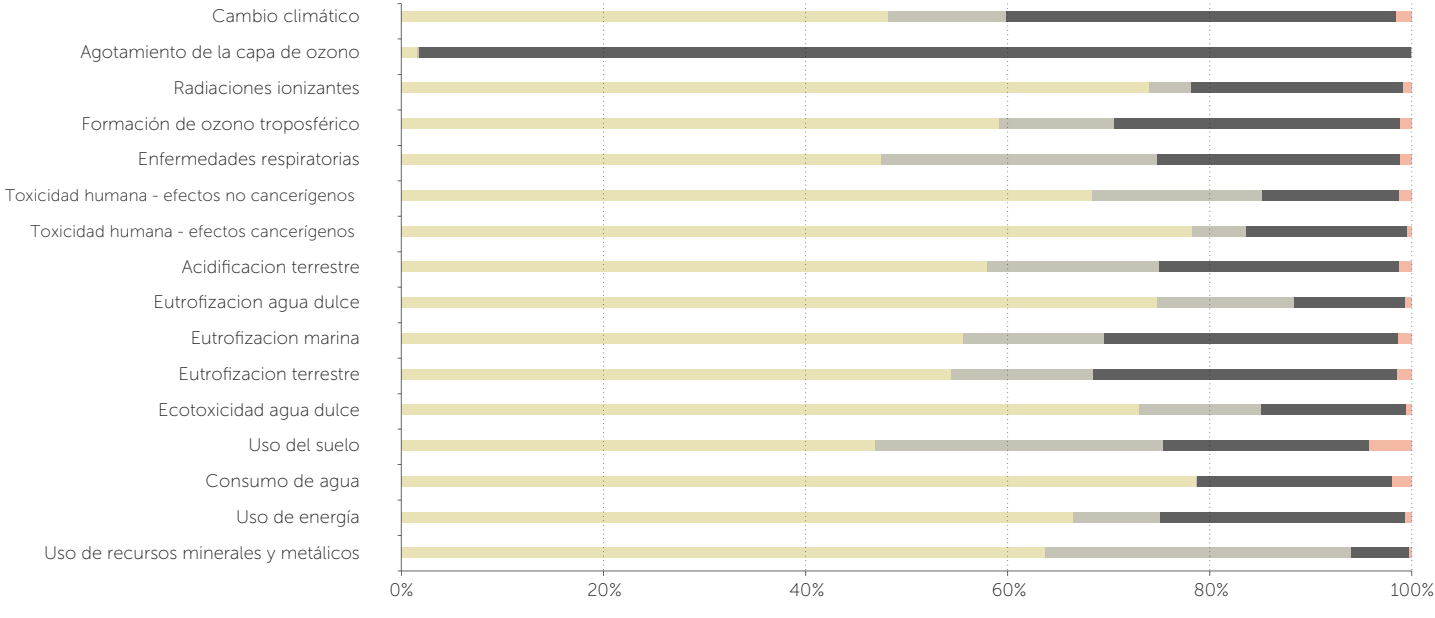


Figura 34. Impactos producidos por los revestimientos e impermeabilizaciones

Leyenda:

- Aislamiento y revestimiento exterior
- Falso techo
- Aislamiento y revestimiento cubiertas
- Enfoscado baños

El espesor de las placas de material aislante contribuye de forma importante a los impactos del SATE sobre la categoría de cambio climático. En grosores de 10 mm la contribución es relativamente menor en % mientras que cuanto mayores son los grosores este porcentaje aumenta de la forma que se muestra en la siguiente figura.

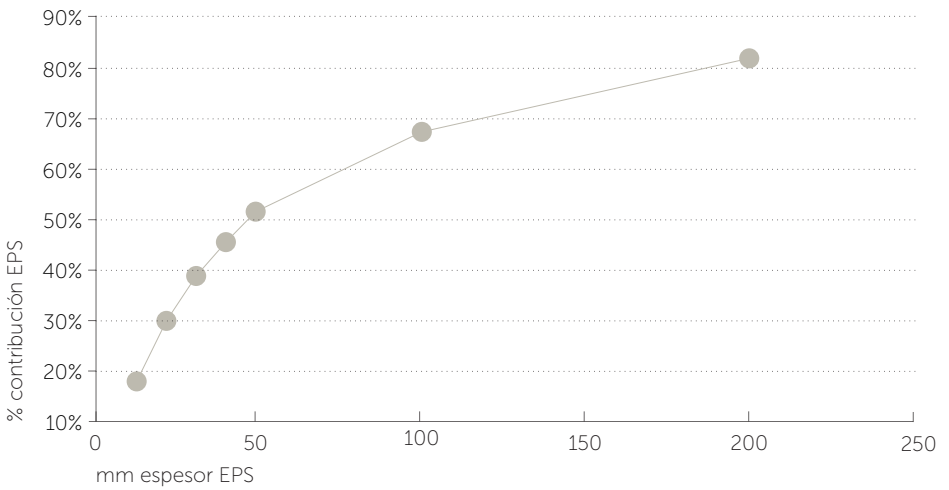
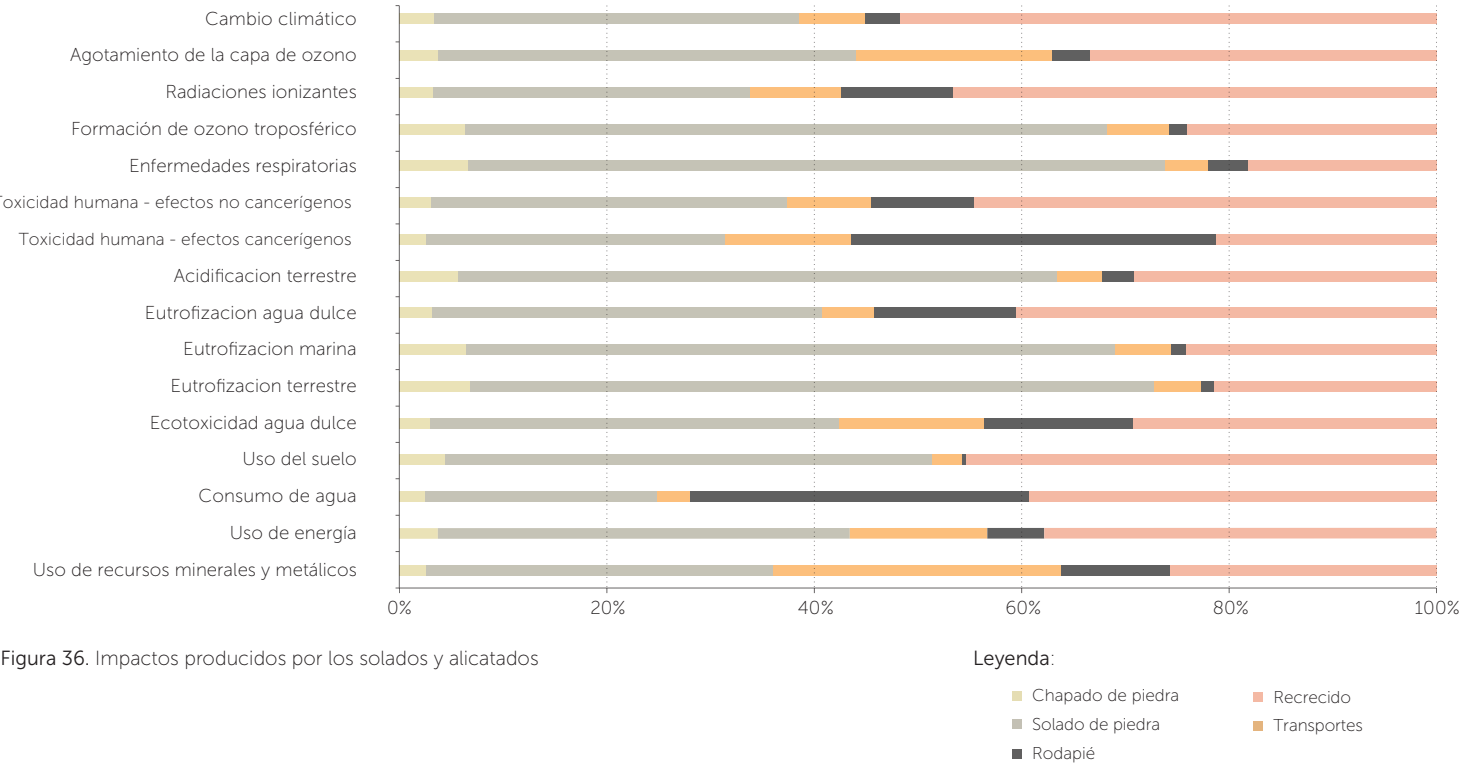


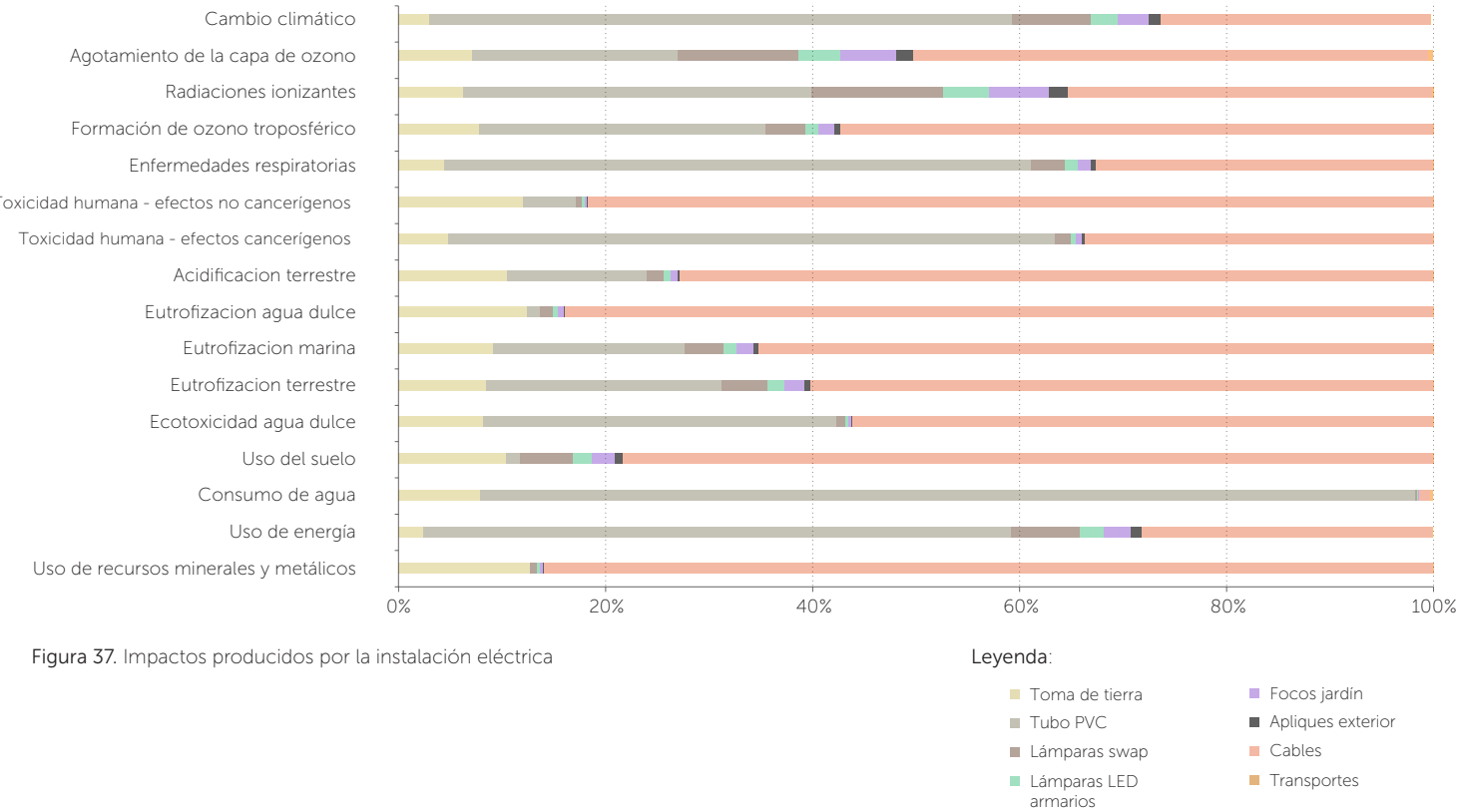
Figura 35. Contribución del EPS a los impactos del aislamiento térmico en la categoría de cambio climático

El aumento de los impactos de las placas de material aislante de mayor espesor podría compensarse con la reducción en los consumos durante el uso de la vivienda. Este efecto se ha analizado en la sección de *Análisis de sensibilidad*.

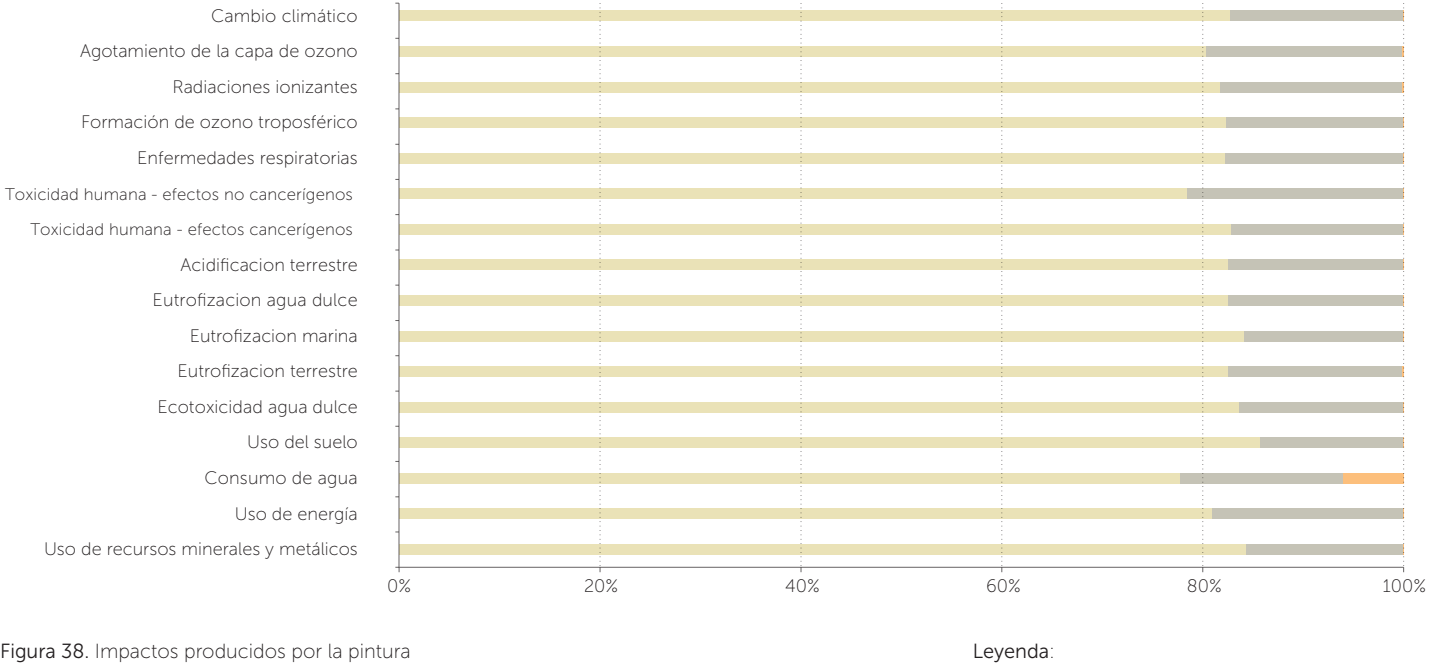
En cuanto a los solados y alicatados, el solado de piedra y el rodapié son los aspectos que contribuyen de forma mayoritaria a los distintos impactos.



Los impactos de la instalación de electricidad son en su mayoría debidos a los cables y a los tubos de PVC que los conducen.



En cuanto a la fase de pintura los mayores impactos están causados por la pintura plástica usada.



7.2. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

El análisis de sensibilidad permite identificar el impacto en los resultados de la variación de algunos de los puntos críticos identificados en la sección anterior.

Los análisis de sensibilidad realizados son los siguientes:

- **AS1.** Incremento del espesor en el sistema SATE.
Se ha incrementado el espesor del aislamiento en 5 cm en todas las superficies.

- **AS2.** Uso de carpintería de aluminio.
Se ha sustituido la carpintería de PVC por carpintería de aluminio.

- **AS3.** Uso de carpintería de madera.
Se ha sustituido la carpintería de PVC por carpintería de madera.

- **AS4.** Uso de ventilación mecánica.
Se ha añadido un sistema de ventilación mecánica.

- **AS5.** Incremento del espesor del SATE y uso de ventilación mecánica.
Se ha incrementado el espesor del aislamiento en 5 cm en todas las superficies y se ha añadido un sistema de ventilación mecánica.

- **AS6.** Instalación de paneles fotovoltaicos.
Se han instalado 7.7 kWp de paneles fotovoltaicos con una producción de 1498 kWh/kWp. La vida de los paneles se ha estimado en 25 años por lo que se ha considerado la renovación de la instalación fotovoltaica a los 25 años de vida del edificio. El dataset de Ecoinvent utilizado para la modelización de la instalación fotovoltaica es el *1 p Photovoltaic slanted-roof installation, 3kWp, single-Si, panel, mounted, on roof {GLO} | market for | Cut-off, U*. Esta instalación produce un total de 11266 kWh/año por lo que hay un consumo residual de electricidad de la red de 5111 kWh/año.

La Tabla 33 muestra el valor de los parámetros modificados en los análisis de sensibilidad realizados.

	Caso base	AS1	AS2	AS3	AS4	AS5	AS6
Espesor del aislamiento de fachadas (mm)	100	150	100	100	100	150	100
Espesor del aislamiento de fachadas (extra) (mm)	200	250	200	200	200	250	200
Espesor del aislamiento en cubierta (mm)	80	200	80	80	80	200	80
Ventanas	PVC	PVC	Aluminio	Madera	PVC	PVC	PVC
Ventilación	Sólo ventanas	Sólo ventanas	Sólo ventanas	Sólo ventanas	Ventilación forzada con recuperación de calor	Ventilación forzada con recuperación de calor	Sólo ventanas
Paneles fotovoltaicos	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SÍ

Tabla 33. Valor de los parámetros en los escenarios del análisis de sensibilidad.

El cálculo de los consumos del edificio en cada una de estas variantes se ha realizado utilizando la herramienta oficial Passivhouse (https://passivehouse.com/04_php/04_php.htm).

Los consumos calculados se resumen en la Tabla 34.

	Caso base	AS1	AS2	AS3	AS4	AS5	AS6
Demanda de calefacción (kWh/(m²a))	33.2	25.0	29.5	28.5	21.0	13.5	33.2
Demanda de refrigeración (kWh/(m²a))	23.9	24.3	25.9	26.0	27.0	28.4	23.9

Tabla 34. Consumos energéticos del uso del edificio en las distintas variantes del análisis de sensibilidad

Los resultados de los análisis de sensibilidad en cuanto a la categoría de cambio climático se muestran en la siguiente figura.

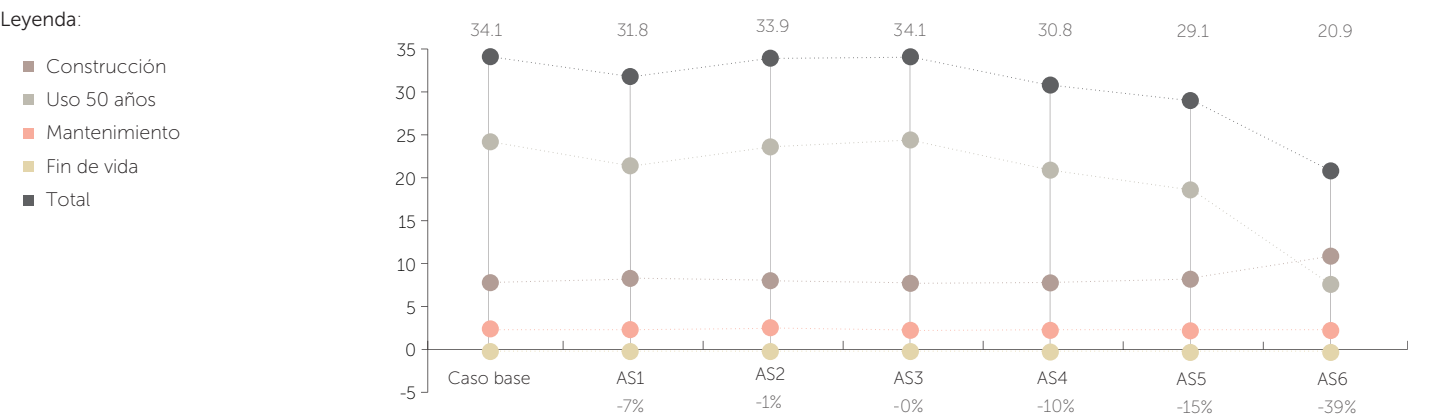


Figura 39. Resultado del análisis de sensibilidad en la categoría de cambio climático

El aumento del espesor del aislamiento (AS1) incrementa los impactos asociados a la construcción del edificio, pero disminuye los consumos energéticos en el uso del edificio y, por tanto, los impactos asociados. En conjunto el impacto global sobre el cambio climático se reduce en un 7%.

El uso de carpintería de aluminio (AS2) incrementa los impactos de la construcción y reduce los consumos energéticos en el uso del edificio. En conjunto el impacto global se reduce en tan solo un 1%.

El uso de carpintería de madera (AS3) produce resultados muy similares a los del caso base.

En cuanto al uso de un sistema de ventilación mecánica (AS4), este trae como consecuencia una reducción importante del consumo energético en el uso del edificio con una reducción del impacto global sobre el cambio climático de un 10%.

Si se combina el efecto del aumento del espesor del aislamiento con la instalación de un sistema de ventilación mecánica (AS5) el efecto en los resultados es de una reducción de un 15% de los impactos sobre el cambio climático.

Finalmente la instalación de paneles fotovoltaicos (AS6), si bien incrementa los impactos de la construcción del edificio, reduce de forma muy significativa los impactos en el uso del edificio. En conjunto la reducción de los impactos globales es de un 39%.

Los resultados de los diferentes escenarios analizados en el resto de categorías de impacto se muestran en la Tabla 35. Estos resultados se han normalizado y ponderado para poder compararlos. La normalización de los resultados del impacto se ha llevado a cabo para identificar las categorías de impacto más importantes y la ponderación de los resultados normalizados ha servido para comparar diferentes escenarios de sensibilidad. Los factores de ponderación y normalización utilizados son los propuestos por la CE y están disponibles en este enlace <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/LCDN/developerEF.xhtml>. Los resultados normalizados y ponderados se muestran al final de la tabla.

Impacto	Indicador	Caso base	AS1	AS2	AS3	AS4	AS5	AS6
Cambio climático	kg CO ₂ eq	34.00	31.74	33.87	34.10	30.79	29.07	20.82
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC11 eq	2.02E-05	2.52E-05	2.02E-05	2.02E-05	1.99E-05	2.50E-05	1.88E-05
Radiaciones ionizantes	kBq U-235 eq	15.74	14.01	15.50	15.90	13.70	12.35	5.83
Formación de ozono troposférico	kg NMVOC eq	0.13	0.12	0.13	0.13	0.12	0.11	0.08
Enfermedades respiratorias	disease inc.	1.16E-06	1.10E-06	1.17E-06	1.15E-06	1.08E-06	1.03E-06	9.48E-07
Toxicidad humana - efectos no cancerígenos	CTUh	4.87E-06	4.49E-06	4.64E-06	4.75E-06	4.42E-06	4.13E-06	3.63E-06
Toxicidad humana - efectos cancerígenos	CTUh	8.18E-07	7.76E-07	8.16E-07	7.97E-07	7.67E-07	7.34E-07	6.40E-07
Acidificación terrestre	mol H+ eq	0.29	0.27	0.29	0.29	0.26	0.24	0.16
Eutrofización agua dulce	kg P eq	0.014	0.013	0.014	0.015	0.013	0.012	0.010
Eutrofización agua marina	kg N eq	0.046	0.042	0.045	0.046	0.042	0.038	0.027
Eutrofización terrestre	mol N eq	0.50	0.46	0.49	0.50	0.45	0.42	0.28
Ecotoxicidad agua dulce	CTUe	25.37	24.20	25.01	24.97	23.92	23.02	21.29
Uso del suelo	Pt	283.86	262.20	278.81	284.89	258.56	241.63	175.21
Consumo del agua	m ³ depriv.	777.86	785.65	1377.71	791.03	776.04	784.17	771.01
Uso de energía	MJ	620.96	565.11	610.02	620.25	550.97	508.19	309.61
Uso de recursos minerales y metálicos	kg Sb eq	1.10E-04	1.05E-04	1.06E-04	1.08E-04	1.04E-04	9.98E-05	1.84E-04
TOTAL		1.42E-10	1.39E-10	2.06E-10	1.44E-10	1.37E-10	1.34E-10	1.21E-10

Tabla 35. Resultados del análisis de sensibilidad normalizados y ponderados

El aumento propuesto en el espesor del aislamiento (AS1) permite reducir el impacto total del edificio en un 2%, y el uso de ventilación forzada solo puede reducir estos impactos en un 4%.
Combinando ambos tipos de medidas (AS5) se logra una reducción total de la huella ambiental del edificio de un 6%. Cambiar el tipo de ventanas empeora sustancialmente la huella ambiental, especialmente en el caso de ventanas de aluminio que producen una huella ambiental 45% mayor. La mejor alternativa es el uso de paneles fotovoltaicos para producir la electricidad que necesita el edificio. Este escenario reduce la huella ambiental en un 15%.

La Tabla 32 permite la identificación de resultados contradictorios. En el caso de AS1 (aumento del grosor del aislamiento) aunque la huella total es menor, algunos de los impactos aumentan. Este es el caso de los impactos sobre el agotamiento de la capa de ozono que se incrementan en un 25%, así como el uso de agua que aumenta ligeramente (1%). El uso de ventilación forzada no muestra ningún tipo de resultado negativo ya que se reducen todos los impactos. En el caso de AS6 (uso de paneles fotovoltaicos) la instalación de estos paneles aumenta los impactos en el uso de recursos (minerales y metales) en un 67%.

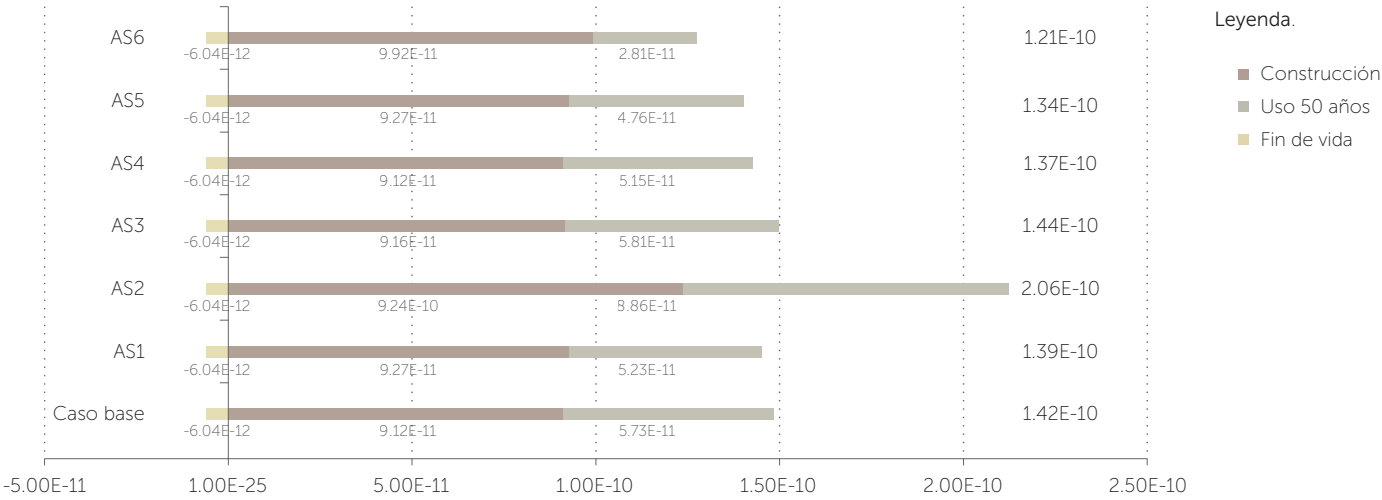


Figura 40. Contribución de las diferentes etapas a los resultados totales de los escenarios

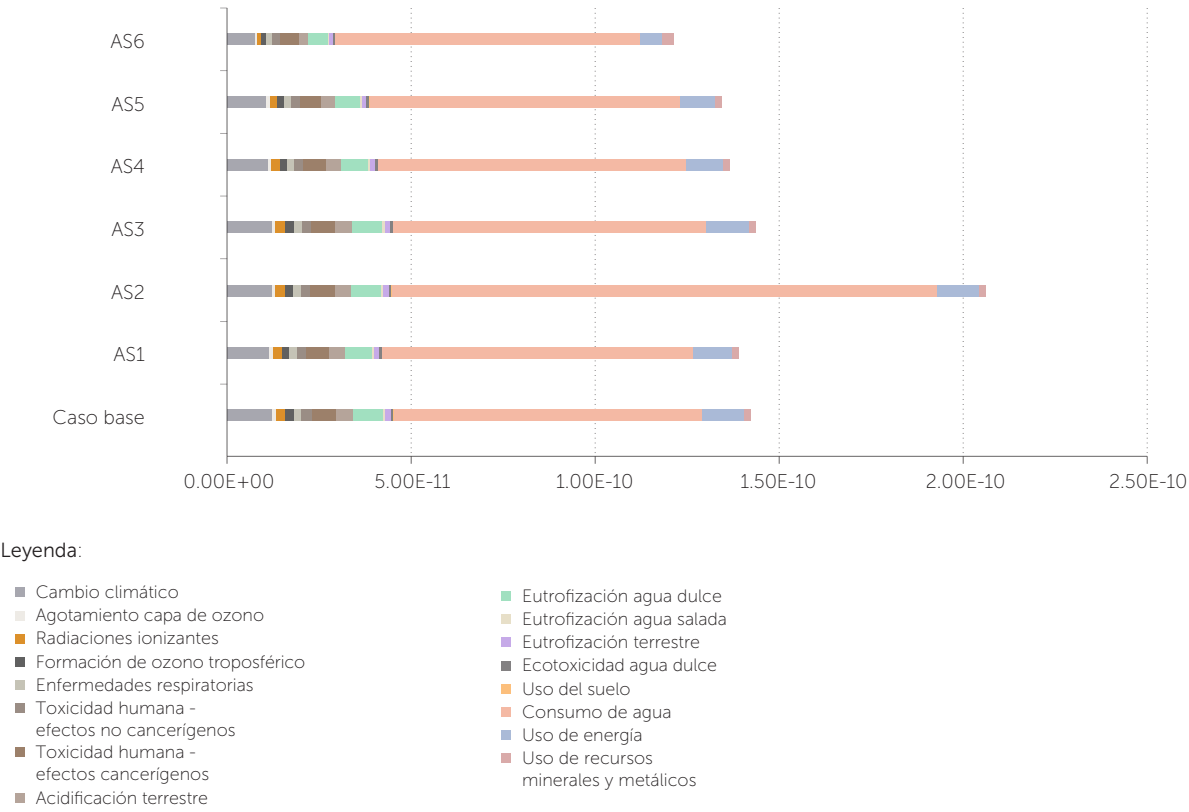


Figura 41. Contribución de las diferentes categorías de impacto a los resultados totales de los escenarios

La Figura 40 y la Figura 41 muestra cómo las diferentes fases del ciclo de vida y las diferentes categorías de impacto contribuyen a la huella total. Podemos ver cómo la fase de construcción domina los resultados totales en todos los escenarios (Figura 39) debido a la gran importancia de los resultados del uso del agua (Figura 40). El método utilizado para cuantificar los resultados de los impactos del uso del agua, el método AWARE, se basa en la cuantificación del agua disponible una vez que se ha satisfecho la demanda de los seres humanos y los ecosistemas acuáticos, lo que equivale a determinar cuál es el potencial de privar a otro usuario a la hora de consumir agua en un área específica (Boulay et al., 2018). Como la mayor parte del consumo de agua tiene lugar en España y se le asigna a España un factor de caracterización muy alto en el método utilizado, los resultados obtenidos no son sorprendentes y alertan de la gran importancia que puede tener el uso del agua en los resultados de la evaluación del ciclo de vida en áreas con escasez de agua como España.

7.3. Comparación con otros estudios

Se ha realizado una revisión de la literatura existente sobre Análisis de Ciclo de Vida de viviendas construidas en madera y en otros materiales. La figura siguiente muestra los resultados de los distintos estudios en comparación con los resultados de este estudio.

En general, los resultados de los ACVs realizados en edificios construidos en madera CLT dan valores más bajos que los de este estudio. Las razones son múltiples, desde diferencias en el alcance del estudio hasta diferencias metodológicas en la consideración del carbono biogénico.

En cuanto a las diferencias en el alcance, la mayoría de los estudios no da suficientes detalles como para saber si todos los aspectos considerados en este estudio lo están también en el resto de ACVs publicados, pero es de suponer que no tienen el nivel de detalle de este estudio. En cuanto a la consideración del CO₂ biogénico, la mayor parte de los estudios consideran las emisiones negativas de la captación del CO₂ biogénico en la madera estructural. Si tenemos esto en cuenta, nuestros resultados se sitúan dentro del rango de los resultados publicados.

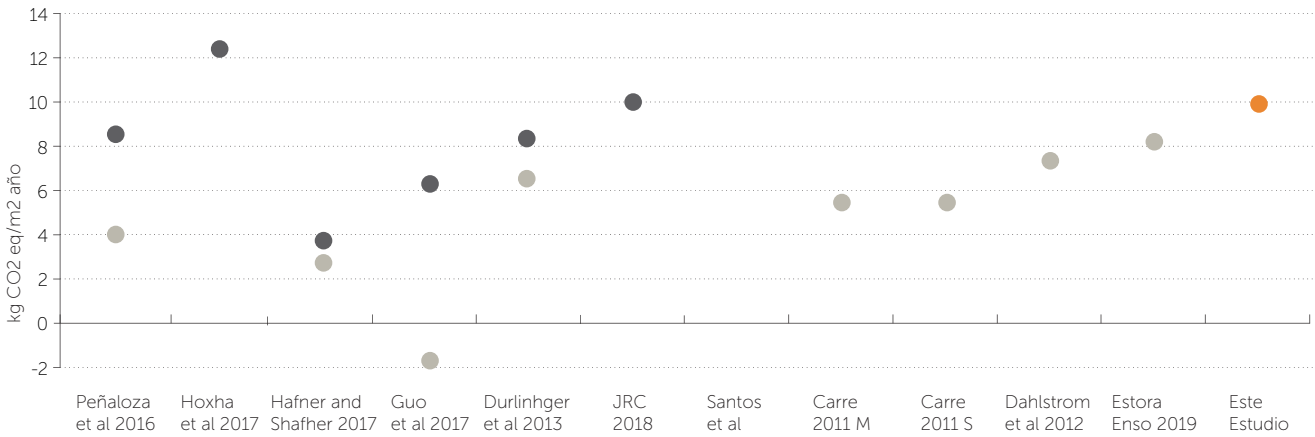


Figura 42. Comparación de los impactos sobre cambio climático con otros estudios publicados

Leyenda.
● Construcción en hormigón
● Construcción en CLT

7.4. Conclusiones, limitaciones y recomendaciones

El estudio realizado ha permitido evaluar la Huella Ambiental de Producto de una vivienda unifamiliar construida con estructura de paneles de madera CLT. Se han analizado, además de los impactos sobre el cambio climático, un total de 15 impactos ambientales adicionales de los cuales los más importantes son:

- Toxicidad humana – efectos no cancerígenos;
- Toxicidad humana – efectos cancerígenos;
- Eutrofización agua dulce;
- Uso del suelo;
- Consumo de agua;
- Uso de energía.

En la **etapa de construcción** del edificio, los impactos sobre el cambio climático se han cuantificado en 390 kg CO₂eq/m². Adicionalmente, la estructura de madera secuestra un total de -142 kg CO₂eq/m².

Los aspectos identificados como más críticos en los resultados de la HAP del edificio analizado son los siguientes:

- Cimentaciones y estructuras;
- Estructura de madera;
- Carpintería de PVC y cerrajería;
- Revestimientos e impermeabilizaciones;
- Solados y alicatados;
- Electricidad;
- Pintura.

La **etapa de uso** del edificio está dominada por los consumos en calefacción del edificio seguido de los consumos en refrigeración y en ACS. Los consumos en iluminación suponen un 6-7% de los impactos. Todos los consumos energéticos son eléctricos y los impactos están muy influenciados por la estructura del mix de generación nacional. En cuanto al mantenimiento del edificio destacan los impactos debidos a la renovación de la pintura y el cambio de ventanas.

La **etapa de fin de vida** produce tanto impactos positivos como negativos. En conjunto, esta etapa ofrece resultados negativos (efectos positivos sobre el medio ambiente) en las categorías de cambio climático, radiaciones ionizantes, toxicidad humana, eutrofización de agua dulce, ecotoxicidad de agua dulce, consumo de agua y uso de energía.

En general, el uso del edificio sigue siendo la etapa que tiene una mayor contribución a los impactos con excepción de las categorías de impacto de agotamiento de la capa de ozono, enfermedades respiratorias, toxicidad humana (cáncer), consumo de agua y uso de recursos minerales y metálicos en los que la etapa de construcción de edificio tiene un mayor peso.

A medida que se produzca la descarbonización esperada en el mix eléctrico del país, los impactos de la etapa de uso irán perdiendo relevancia frente a la etapa de construcción en la mayoría de los impactos.

Del **análisis de sensibilidad** se han obtenido que el aumento del espesor del aislamiento incrementa los impactos asociados a la construcción del edificio, pero disminuye los consumos energéticos en el uso del edificio y, por tanto, los impactos asociados. En conjunto, el impacto global sobre el cambio climático se reduce en un 7%. El cambio de carpinterías de PVC por carpinterías de aluminio o madera no produce un impacto apreciable en los resultados referidos al cambio climático. En cuanto al uso de un sistema de ventilación mecánica, este trae como consecuencia una reducción importante del consumo energético en el uso del edificio con una reducción del impacto global sobre el cambio climático de un 10%. Si se combina el efecto del aumento del espesor del aislamiento con la instalación de un sistema de ventilación mecánica el efecto en los resultados es de una reducción de un 15% de los impactos sobre el cambio climático. Finalmente la instalación de paneles fotovoltaicos, si bien incrementa de forma importante los impactos de la construcción del edificio, reduce de forma muy significativa los impactos en el uso del edificio. En conjunto la reducción de los impactos globales sobre el cambio climático producida por la instalación de paneles fotovoltaicos es de un 39%.

Los resultados normalizados y ponderados mostraron que los impactos de la construcción son de mayor relevancia que los impactos de la fase de uso debido al papel muy relevante de los resultados de escasez de agua. Esto se debe al efecto combinado de una contribución muy importante de la fase de construcción a los resultados del uso del agua y al alto factor de caracterización del consumo de agua en un país con escasez de agua como España.

Entre los posibles escenarios de mejora analizados, los resultados mostraron que las inversiones en medidas de aislamiento, así como el uso de sistemas de ventilación forzada mejoran el comportamiento ambiental del edificio, reduciendo la huella ambiental. Los mejores resultados se obtuvieron con el uso de paneles fotovoltaicos que demostraron reducir significativamente la huella ambiental.

Se identificaron algunos resultados potencialmente contradictorios entre categorías de impacto. El uso de un mayor espesor de aislamiento aumenta los impactos de agotamiento del ozono en un 25%, y el uso de paneles fotovoltaicos aumenta los impactos en el uso de recursos (minerales y metales) en un 67%.

En base a los resultados obtenidos en este estudio las recomendaciones para disminuir la Huella Ambiental de esta vivienda serían las siguientes:

- Minimizar el uso de hormigón;
- Reducir las distancias de transporte;
- Aumentar los espesores del sistema de aislamiento térmico;
- Instalar ventilación mecánica;
- Instalar paneles fotovoltaicos;
- Minimizar el uso de pinturas o usar productos menos contaminantes;
- Separar las corrientes de residuos susceptibles de ser recicladas y llevarlas a reciclaje.

GLOSARIO

Aeroterminia: Sistema de climatización que utiliza tecnología limpia basada en el aprovechamiento de la energía almacenada en forma de calor en el aire del medio ambiente. Está compuesto por un equipo de calefacción/climatización y/o generación de agua caliente sanitaria, que se basa en extraer la mencionada energía del aire exterior (ambiente) mediante una bomba de calor. De esta forma, el aire se considera la fuente renovable que se usa para climatizar los espacios cerrados.

Análisis de sensibilidad: procedimientos sistemáticos para la estimación de los efectos de las opciones elegidas en relación con los métodos y datos sobre los resultados del estudio de Huella Ambiental de Producto (HAP) (con arreglo a la norma ISO 14040:2006). 2006). (Diario Oficial de la Unión Europea, 2013)

Categoría de impacto: clase de uso de recursos o de impacto ambiental a que corresponden los datos del perfil de uso de los recursos y de emisiones. (Diario Oficial de la Unión Europea, 2013)

Ecotoxicidad: categoría de impacto ambiental relativa a los impactos tóxicos que afectan a un ecosistema, que son nocivos para distintas especies y que cambian la estructura y función del ecosistema. Es el resultado de una serie de diferentes mecanismos toxicológicos provocados por la liberación de sustancias con un efecto directo sobre la salud del ecosistema. (Diario Oficial de la Unión Europea, 2013)

Estructura del mix de generación nacional: conjunto de tecnologías de generación de electricidad y del sistema en su conjunto. (Agosti, Padilla y Requejo)

Eutrofización: proceso por el que los nutrientes (principalmente nitrógeno y fósforo) procedentes de vertidos de aguas usadas y de tierras agrícolas fertilizadas aceleran el crecimiento de las algas y demás vegetación en el agua. La degradación de la materia orgánica consume el oxígeno, lo que provoca una deficiencia de esta sustancia y, en algunos casos, la muerte de los peces. La eutrofización traduce la cantidad de sustancias emitidas a una medida común expresada como el oxígeno necesario para la degradación de la biomasa muerta. (Diario Oficial de la Unión Europea, 2013)

Flujo de referencia: medida de las salidas de los procesos, en un sistema del producto determinado, requerida para cumplir la función expresada mediante la unidad de análisis (con arreglo a ISO 14040: 2006). (Diario Oficial de la Unión Europea, 2013)

Flujos no elementales: entradas y salidas que no son flujos elementales y que requieren más esfuerzos de modelización para transformarse en flujos elementales. Ejemplos de entradas no elementales son la electricidad, los materiales, o los procesos de transporte, y pueden citarse como ejemplos de salidas no elementales los residuos y los subproductos. (Diario Oficial de la Unión Europea, 2013)

HDPE: *High Density Polyethylene*. Polietileno de alta densidad. Material polimérico.

Indicador de categoría de impacto de huella ambiental: Re-presentación cuantificable de una categoría de impacto de HA (con arreglo a ISO 14044: 2006). (Diario Oficial de la Unión Europea, 2013)

- **kg CO₂ eq.** Kilogramo equivalente de dióxido de carbono. Utilizado como indicador del nivel de emisión de Gases de Efecto Invernadero, según el *Modelo base de 100 años del Panel Internacional de Cambio Climático (IPCC)*.

- **kg CFC-11 eq.** Kilogramo equivalente de triclorofluorometano (CFC-11), que es un clorofluorocarbono, un compuesto químico que al liberarse a la atmósfera contribuye al adelgazamiento de la capa de ozono. Por este motivo el kg CFC-11 eq. es utilizado como indicador del agotamiento de la capa de ozono. Los clorofluorocarbonos se usan principalmente en aerosoles y en los sistemas de refrigeración.

- **kBq U-235 eq.** Kilobecquerelio equivalente de Uranio (U) 235, siendo el becquerel la unidad que mide la actividad radiactiva (1 Bq es equivalente a una desintegración radiactiva por segundo). Utilizado como indicador de radiaciones ionizantes.

- **CTUh.** Unidad tóxica comparativa para humanos, unidad que se caracteriza por proporcionar el aumento estimado en morbilidad en la población humana total por unidad de masa de un contaminante emitido, por lo tanto, CTUh por kg emitido = casos de enfermedad por kg emitido, según el *Modelo USEtox*. Unidad utilizada como indicador de la toxicidad humana, diferenciando entre aquellas de efecto cancerígeno y las que no.

- **mol H⁺ + eq.** Mol equivalente de ion hidrógeno H⁺, siendo el mol la unidad que mide la cantidad de una determinada sustancia, en este caso, el hidrógeno, para utilizarse como indicador del impacto de acidificación terrestre. Los iones de hidrógeno se liberan cuando los gases de emisiones de NOx, NH3 y SOx se mineralizan, contribuyendo a la acidificación del suelo y del agua.

- **kg P eq.** Kilogramo equivalente de fósforo (P). Utilizado como indicador de la eutrofización del agua dulce.
- **kg N eq.** Kilogramo equivalente de nitrógeno (N). Utilizado como indicador de la eutrofización de agua marina.
- **mol N eq.** Mol equivalente de nitrógeno (N). Utilizado como indicar de la eutrofización terrestre.
- **CTUe.** Unidad tóxica comparativa para los ecosistemas, unidad que se caracteriza por proporcionar una estimación de la fracción de especies potencialmente afectadas (PAF) integrada en el tiempo y el volumen por unidad de masa de un químico emitido, por lo tanto, CTUe por kg emitido = [PAF m³ por kg emitido, según el *Modelo USEtox*. Unidad utilizada como indicador de la ecotoxicidad.
- **kg Sb eq.** Kilogramo equivalente de antimonio (Sb). Utilizado como indicador de uso de recursos minerales y metálicos.

Límites del sistema: definición de los aspectos incluidos o excluidos del estudio. (Diario Oficial de la Unión Europea, 2013)

Perfil de uso de los recursos y de emisiones: inventario de datos recogidos para representar las entradas y las salidas asociadas con cada fase de la cadena de suministro de la organización que se estudia. La compilación del perfil de uso de recursos y de emisiones se completa cuando hay flujos no elementales, es decir, complejos que se transforman en flujos elementales. (Diario Oficial de la Unión Europea, 2013)

Radiaciones ionizantes: categoría de impacto de HA correspondiente a los efectos nocivos sobre la salud humana debidos a emisiones radiactivas. (Diario Oficial de la Unión Europea, 2013)

Ozono troposférico: ozono que se encuentra en la troposfera (capa atmosférica entre el suelo y a unos 10 km de altura). Puede encontrarse en concentraciones superiores a las habituales en la atmósfera y, en este caso, puede ser considerado un contaminante atmosférico.

REFERENCIAS

Austria, H. F. (2011) ‘Ecological Balance Sheet of the production of the product STORA ENSO within the scope of the EcoTimber project’.

Boulay, A. M. et al. (2018) ‘The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: assessing impacts of water consumption based on available water remaining (AWARE)’, *International Journal of Life Cycle Assessment*. Springer Verlag, 23(2), pp. 368–378. doi: 10.1007/s11367-017-1333-8.

Chen, C. et al. (2019) ‘Life Cycle Assessment (LCA) of Cross-Laminated Timber (CLT) Produced in Western Washington: The Role of Logistics and Wood Species Mix’, *Sustainability*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 11(5), p. 1278. doi: 10.3390/su11051278.

CYPE Ingenieros, S. A. (2019) *Precio en España de Ud de Arqueta. Generador de precios de la construcción*. Available at: http://carm.generador-deprecios.info/obra_nueva/Instalaciones/Fontaneria/Elementos/Arqueta_0_0_0_0_2_0_0.html (Accessed: 3 May 2019).

Diario Oficial de la Unión Europea (2013) ‘RECOMENDACIÓN DE LA COMISIÓN de 9 de abril de 2013 sobre el uso de métodos comunes para medir y comunicar el comportamiento ambiental de los productos y las organizaciones a lo largo de su ciclo de vida’, p. 210. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32013H0179&from=ES> (Accessed: 2 May 2019).

Fazio, S. et al. (2018) *Supporting information to the characterisation factors of recommended EF Life Cycle Impact Assessment methods*. doi: 10.2760/002447.

Greening, B. and Azapagic, A. (2012) ‘Domestic heat pumps: Life cycle environmental impacts and potential implications for the UK’, *Energy*. Pergamon, 39(1), pp. 205–217. doi: 10.1016/J.ENERGY.2012.01.028.

LAVOLA (2017) *Sistema de Aislamiento Térmico por el Exterior (SATE) Declaración Ambiental de Producto*. Available at: www.lavola.com (Accessed: 24 June 2019).

Ministerio para la Transición Ecológica (2019) *Borrador del Plan Nacional de Energía y Clima 2021-2030*. Available at: https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/participacion-publica/documentoparticipacionpublicaborradordelplannacionalintegradoeenergíayclima2021-2030_tcm30-487344.pdf (Accessed: 27 July 2019).

PEF4BUILDINGS (2018). doi: 10.2779/23505.

Stora Enso (2014) ‘EPD Environmental Product Declaration. CLT by Stora Enso’.

