

# Valoración ambiental de la rehabilitación energética de las zonas menos eficientes del AMB mediante ACV

Sergio García-Pérez<sup>1</sup>, Jorge Sierra-Pérez<sup>2,3</sup>, Jesús Boschmonart-Rives<sup>3</sup>, Gil Lladó Morales<sup>4</sup>, Ana Romero Càlix<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Arquitectura, Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza - España

<sup>2</sup> Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza - España

<sup>3</sup> Sostenipra (ICTA – IRTA - Inèdit Innovació SL) 2014 SGR 1412. Instituto de Ciencia y Tecnología Ambiental (ICTA), Unidad de excelencia «María de Maeztu» (MDM-2015-0552), Universidad Autónoma de Barcelona (UAB) - España

<sup>4</sup> Área Metropolitana de Barcelona (AMB) España

---

## Abstract

---

The retrofitting of less energy efficient building stock represents one of the most significant challenges in the transition to a low-carbon economy. In this regard, the level of insulation installed in buildings is directly related to the energy efficiency of the building, and consequently to the urban area. In addition, several studies have shown that a comprehensive perspective of energy efficiency is needed, together with calculating the importance of introducing Life Cycle Assessment (LCA) methodology. The purpose of this study is to develop a methodology to: first, measure the energy efficiency level of specific urban areas and their buildings using a bottom-up characterization geospatial model in an integral perspective; second, the environmental impact caused by refurbishment of these building envelopes using a life cycle assessment method, and thirdly, know at the territorial level the implication of the environmental impacts generated by the retrofitting of the less efficient buildings, providing the basis for supporting decisions on building stock retrofitting for urban scale.

**Keywords:** *Retrofit, residential building stock, energy efficiency, LCA, GIS, urban scale*

---

## Resumen

---

La rehabilitación del parque inmobiliario menos energéticamente eficiente representa uno de los retos más importantes en la transición hacia una economía baja en carbono. Al respecto, el nivel de aislamiento térmico instalado en edificios está directamente relacionado con su eficiencia energética y consecuentemente con el área urbana dónde se localiza. Además, varios estudios han demostrado la necesidad de introducir una perspectiva integral de la eficiencia energética teniendo en cuenta la metodología de Análisis del Ciclo de Vida (ACV). El propósito de este estudio es desarrollar una metodología para: primero, medir el nivel de eficiencia energética de áreas urbanas y sus edificios usando un modelo de caracterización geoespacial *bottom-up* desde una perspectiva integral; segundo, calcular el impacto ambiental causado por la rehabilitación de estos edificios utilizando el método de Análisis del Ciclo de Vida, y tercero, conocer a escala territorial la implicación de los impactos ambientales generados por la rehabilitación de los edificios menos eficientes, proporcionando una base científica sobre la que apoyar las decisiones de rehabilitación a escala urbana.

**Palabras clave:** *Rehabilitación, edificación residencial, eficiencia energética, ACV, SIG, escala urbana*

---

## **Resum**

---

La rehabilitació del parc immobiliari menys energèticament eficient representa un dels reptes més importants en la transició cap a una economia baixa en carboni. Així, el nivell d'aïllament tèrmic instal·lat en edificis està directament relacionat amb la seva eficiència energètica i conseqüentment amb l'àrea urbana on es localitza. A més, diversos estudis han demostrat la necessitat d'introduir una perspectiva integral de l'eficiència energètica tenint en compte la metodologia d'Anàlisi de Cicle de Vida (ACV). El propòsit del present estudi és desenvolupar una metodologia per a: primer, mesurar el nivell d'eficiència energètica d'àrees urbanes i els seus edificis fent servir un model de caracterització geoespacial *bottom-up* des d'una perspectiva integral; segon, calcular l'impacte ambiental causat per la rehabilitació d'aquests edificis utilitzant el mètode d'Anàlisi de Cicle de Vida, i tercer, conèixer a escala territorial la implicació dels impactes ambientals generats per la rehabilitació dels edificis menys eficients, proporcionant una base científica sobre la qual recolzar les decisions de rehabilitació a escala urbana.

**Paraules clau:** *Rehabilitació, edificación residencial, eficiencia energética, ACV, SIG, escala urbana*

---

## 1. Introducción

---

### 1.1 Interés

---

La Unión Europea a través del Programa Marco Horizonte 2020 [1] manifiesta su interés en la investigación de las grandes cuestiones que afectan a los ciudadanos europeos entre las que se incluye el medio ambiente y la eficiencia en el uso de los recursos y las materias primas, así como la generación de sociedades más inclusivas e innovadoras. De estos objetivos se deriva la transformación del sistema productivo hacia la denominada economía baja en carbono. Además, las previsiones de aumento de población en las áreas urbanas ponen de manifiesto que este reto definido por la Unión Europea se producirá en gran medida en nuestras ciudades [2].

La transformación hacia una economía baja en carbono supone una oportunidad para las ciudades, donde el parque inmobiliario juega un papel esencial en la misma [3], ya que concentra gran parte de los consumos energéticos. En el caso del parque inmobiliario español la sostenibilidad y eficiencia del mismo ha centrado un extenso número de estudios publicados por entidades de muy diversa índole y con objetivos muy diversos. Entre los más destacados se encuentran los desarrollados por el Ministerio de Fomento a través de los Atlas de Vulnerabilidad Urbana y Atlas de la Edificación Residencial [4, 5], o los que promueve el Green Building Council España (GBCe), a través del Grupo de Trabajo Rehabilitación (GTR) [6], todos ellos realizados en base a los datos que disponen los censos de Población y Vivienda.

Estos datos, actualizados en el censo de 2011, ponen de manifiesto que el 54% de las viviendas<sup>i</sup> del parque residencial edificado español se construyó con anterioridad a 1980, cuando todavía no existía ninguna normativa básica de utilización de aislamiento térmico en la construcción. Sabiendo que en 2006 las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) del sector residencial por consumo de energía fueron de alrededor de 60 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> [7], queda claro que uno de los retos para la integración de las ciudades en una economía baja en carbono debe ser la reducción de la dependencia energética del sector residencial. Además, recientes estudios [8, 9] justifican la necesidad de tener en cuenta una nueva perspectiva incluyendo el ciclo de vida en la rehabilitación residencial.

El trabajo desarrollado introduce nuevas vías de investigación en continuidad con las tesis doctorales de J. Rives Boschmonart [10] y J. Sierra-Pérez [11]. Investiga en primer lugar, en el desarrollo de un modelo de caracterización de la edificación energéticamente más vulnerable. Posteriormente analiza desde la metodología del Análisis del Ciclo de Vida (ACV) las soluciones de rehabilitación de superficie envolvente más comunes. Por último, se calculan los impactos de rehabilitar diferentes soluciones constructivas a una escala territorial, para facilitar la toma de decisiones a los agentes políticos en materia de rehabilitación edificatoria.

### 1.2 Estudios relacionados

---

En el contexto español se han llevado a cabo investigaciones y herramientas para la caracterización del parque edificado [4–6]. Sus metodologías parten de datos estadísticos nacionales, en combinación con otros del censo de población y viviendas, siendo su escala de agregación mínima la sección censal.

Sin embargo, la metodología empleada en el último Censo de 2011, pone de manifiesto problemas en una escala de caracterización más detallada. Por ello, resulta interesante buscar nuevos modelos de caracterización basados en fuentes fácilmente actualizables y accesibles, a través de instrumentos más eficaces e interoperables.

Según los estudios realizados por L. Swan y V. Urgusal [12] sobre modelos de caracterización, resultan de interés los modelos de abajo a arriba, comúnmente denominados *bottom-up*, cuya principal ventaja es la mayor disgregación y por tanto trabajo a escalas de análisis más pequeñas. Además, los inconvenientes detectados en estas metodologías se ven minimizados hoy en día con el uso de herramientas más eficaces como Sistemas de Información Geográfica (SIG), y bases de datos.

Recientes estudios están utilizando la tecnología de los SIG para la caracterización del stock inmobiliario, casi todos ellos desde una perspectiva energética. Entre ellos, resultan de interés el trabajo desarrollado por A. Mastrucci et al. [13] y el Área Metropolitana de Barcelona [14]. El primero relaciona las metodologías *bottom-up* a escala edificio a edificio, con la rehabilitación de edificios a escala urbana. La metodología desarrollada se adapta a la casuística y fuentes propia del contexto de Luxemburgo. El segundo utiliza un modelo geoespacial de caracterización *bottom-up* aplicado al contexto nacional, si bien se realiza desde una perspectiva energética.

### 1.3 Objetivos de la investigación

---

Esta investigación que desarrolla un método de caracterización *bottom-up* para el cálculo de las implicaciones ambientales a través del ACV, a una escala territorial a través de herramientas SIG servirá para:

- 1) Disponer de un mapa global del estado de las viviendas en el AMB con datos actualizados
- 2) Conocer las soluciones constructivas tipo más sostenibles
- 3) Obtener una base científica sobre la que plantear estrategias futuras en materia de rehabilitación edificatoria.

## 2. Metodología

---

El desarrollo de la investigación, que toma como caso de estudio el parque inmobiliario residencial del Área Metropolitana de Barcelona, se realiza siguiendo la estructura propuesta en la Figura 1:

- 1) Introducción, dónde se justifica la necesidad de investigación y se repasan las principales aportaciones en la materia
- 2) Metodología, dónde se desarrolla por una parte la caracterización de la envolvente térmica (fachadas y cubiertas), identificando la superficie más energéticamente vulnerable; y por otra el Análisis del Ciclo de Vida de las soluciones constructivas tipo en rehabilitación de fachadas y cubiertas.
- 3) Resultados, de los apartados anteriores, extrapolados a diversas escalas de trabajo, presentados tanto en una extrapolación directa, como de valoración de escenarios.
- 4) Discusión y conclusiones, incluyendo además posibles líneas de trabajo abiertas tras la realización de esta investigación.

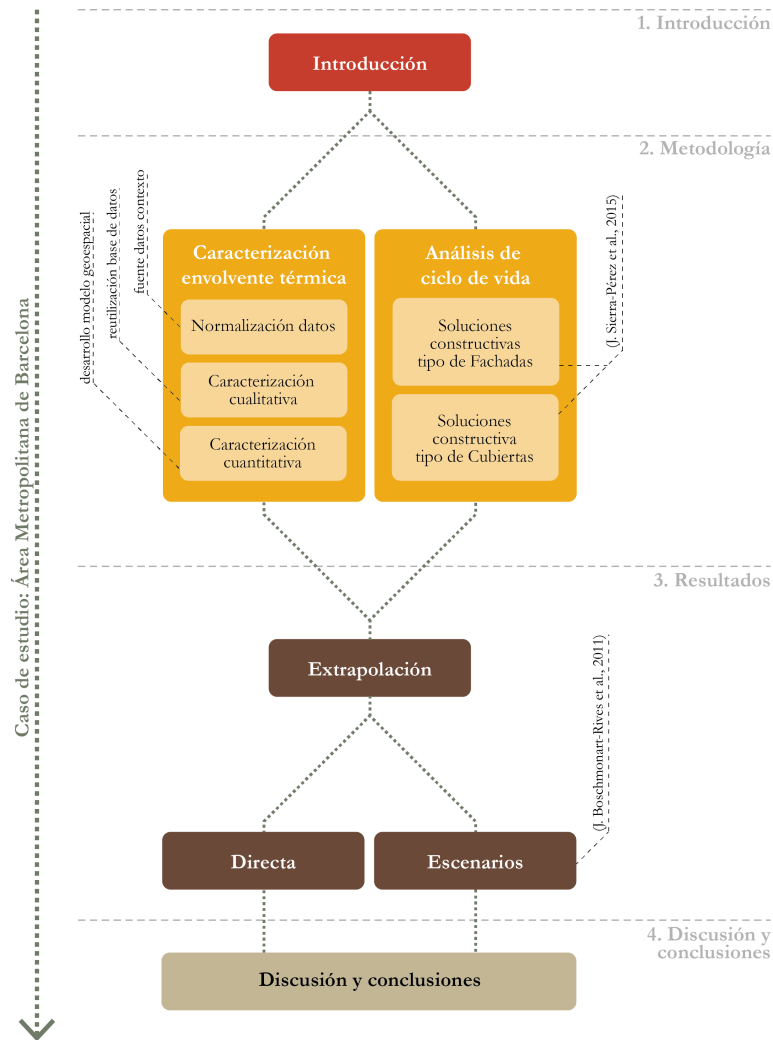


Figura 1. Esquema de metodología de trabajo empleada

## 2.1 Caracterización de la envolvente térmica

La caracterización *bottom-up* escala edificio a edificio adaptada al contexto español consta de 3 pasos: obtención y normalización de datos, caracterización cualitativa de la edificación y caracterización cuantitativa de la envolvente térmica.

### 2.1.1 Obtención y normalización de datos

Frente a los estudios de caracterización residencial realizados hasta la fecha en España, se propone un nuevo método cuyas fuentes sean más accesibles (*open data*) realizados a través de instrumentos que permitan mayor interoperabilidad y actualización (*Sistemas de Información Geográfica*), aplicables a todo el territorio español.

Para la caracterización cualitativa, se utilizarán bases de datos catastrales [15, 16], accesibles a todos los ciudadanos. Con alcance nacional<sup>ii</sup>, se obtiene: el año de construcción de la edificación, así como su tipología constructiva (por extensión, morfología urbana). Sin embargo, al facilitar el AMB datos más detallados sobre morfología urbana, finalmente se tendrán en cuenta estos últimos.

La caracterización cualitativa se realiza obteniendo a través de datos catastrales (de nuevo considerando un alcance nacional): un modelo geoespacial (*Shapefile*) y datos

que relacionan la superficie construida de cada unidad constructiva con su uso, para cada inmueble residencial.

### 2.1.2 Caracterización cualitativa

La caracterización cualitativa cuenta con dos categorías principales: el año de construcción y la morfología urbana, condiciones suficientes en la escala urbana para obtener información sobre la normativa técnica de aislamiento térmico de edificios, así como características morfológicas y tipológicas.

De acuerdo a los estudios realizados por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía [17] hay tres categorías principales a considerar dependiendo del año de construcción: (i) los edificios construidos anteriormente a 1981, cuando no existía normativa de obligado cumplimiento sobre aislamiento térmico, (ii) edificios construidos entre 1981 y 2007, cuando la primera normativa entró en vigor, la cual exige demandas mínimas de aislamiento térmico para las envolventes de los edificios por primera vez [18] y (iii) los edificios construidos a partir de 2008, cuando el Código Técnico de la Edificación entro en vigor, el cual incrementa el requerimiento mínimo de aislamiento térmico [19].

Como se ha descrito anteriormente, este estudio tiene en cuenta los datos facilitados por el AMB, en lugar de realizar la caracterización morfológica por los datos Catastrales. Las variables de estudio, que se incluyen entre los datos proporcionados, de mayor detalle y adaptados al contexto local, cuentan con 4 categorías principales: Bloque, Ensanche, Tejido Histórico y Unifamiliar (Figura 2).

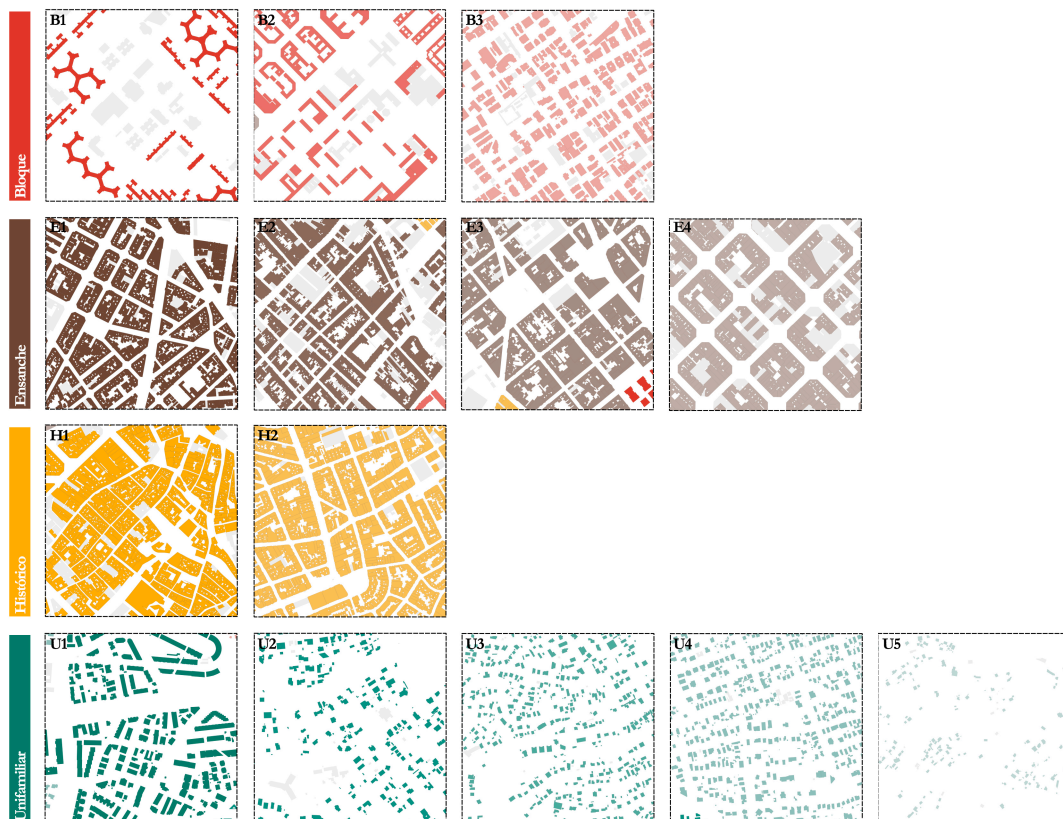


Figura 2. Morfologías urbanas consideradas

### 2.1.3 Caracterización cuantitativa

Se desarrolla un modelo geoespacial en QGIS [20] usando los datos y cartografía de la Dirección General del Catastro [15, 16, 21]. Primero, para cada edificio el método obtiene a través de GIS: (i) la huella del edificio, que representa el área total de cubierta del edificio; (ii) el perímetro total; y (iii) el perímetro exterior.

A continuación, se calcula la Superficie Calefactada Construida (Heated Floor Area, HFA), excluyendo de la superficie construida total las áreas no calefactadas como garajes, almacenes y usos industriales. Posteriormente se obtiene la Altura Media Calefactada (Average Heated Height, AHH), que se define como la diferencia entre la HFA y la huella del edificio, multiplicando el resultado por la altura media entre plantas, definida en España como 3 metros [17].

Con estos datos el estudio obtiene la Superficie de Fachada Calefactada Bruta (Gross Heated Façade Surface, GHFS), multiplicando el perímetro exterior por AHH. Sin embargo, deben considerarse los huecos como parte de la fachada. Rodríguez-Soria *et al.* [22] caracterizaron el estándar de los bloques de vivienda en el contexto español, calculando la superficie de huecos (ventanas y puertas) respecto a la fachada, siendo está aproximadamente del 30%.

Sin embargo, es necesario ampliar esta caracterización al resto de morfologías urbanas consideradas en este estudio, siguiendo la metodología por Rodríguez-Soria. La GHFS sin huecos se denomina Superficie de Fachada Calefactada Neta (Net Heated Façade Surface, NHFS), y es la que servirá para el estudio de base para el cálculo del impacto ambiental de la rehabilitación de las fachadas menos eficientes.

## 2.2 Cálculo del Análisis del Ciclo de Vida de rehabilitación en edificios

### 2.2.1 Descripción y límites del sistema

La metodología se basa en los estudios ya realizados por Sierra-Pérez *et al.* [23] sobre Análisis del Ciclo de Vida para la cuantificación de implicaciones ambientales del aislamiento térmico en diferentes sistemas de fachadas, desde una aproximación de la extracción a la puesta en uso (*cradle-to-site*). Tal como indica la Figura 3 esta aproximación se aplicará así sobre las fases de producción (extracción y transformación de los materiales brutos, transporte a la planta de manufacturación y manufacturado), transporte al edificio e instalación de la superficie envolvente de acuerdo a la normativa EN 15804:2014 [24].

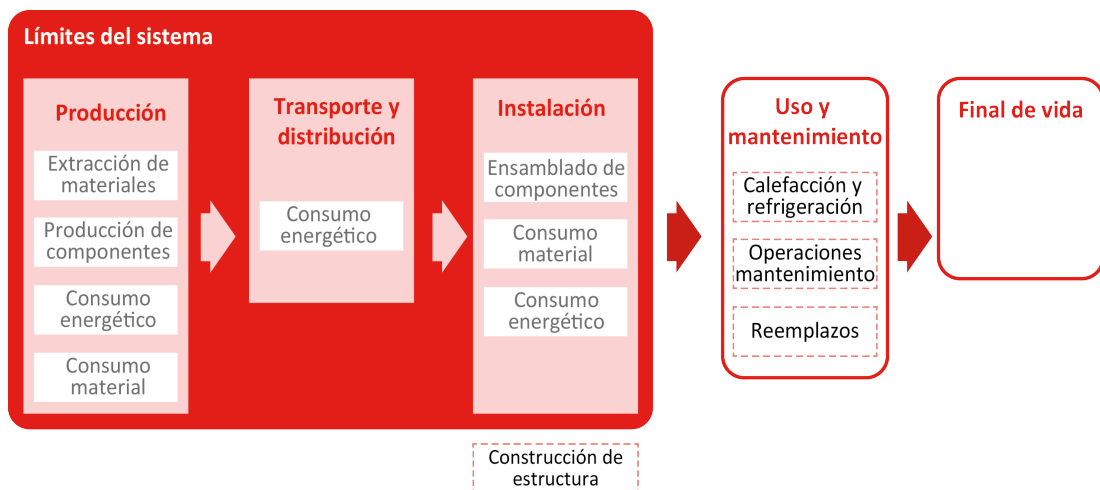


Figura 3. Diagrama del sistema del ciclo de vida de la superficie envolvente.

Para la realización del ACV se ha utilizado el software *Simapro 7.3* [25] y la base de datos *Ecoinvent 3.1* [26]. Las categorías de impacto ambiental incluidas en el estudio son el Potencial de calentamiento global (*Global Warming Potential: GWP*), y la Energía contenida embebida (*Embodied Energy, EE*), debido a su creciente importancia en la demanda energética de los edificios.

Estos estudios previos definen una Unidad Declarada (UD), la cual obtiene la cuantificación del impacto medioambiental de la producción, transporte e instalación necesaria para la rehabilitación de 1 m<sup>2</sup> de fachada de edificio existente dependiendo de las siguientes variables que a continuación se estudian en detalle: (i) localización geográfica del edificio (ii) el tipo de solución constructiva escogida, (iii) el tipo de material de aislamiento térmico y (iv) el año de construcción del edificio.

### 2.2.2 Localización geográfica

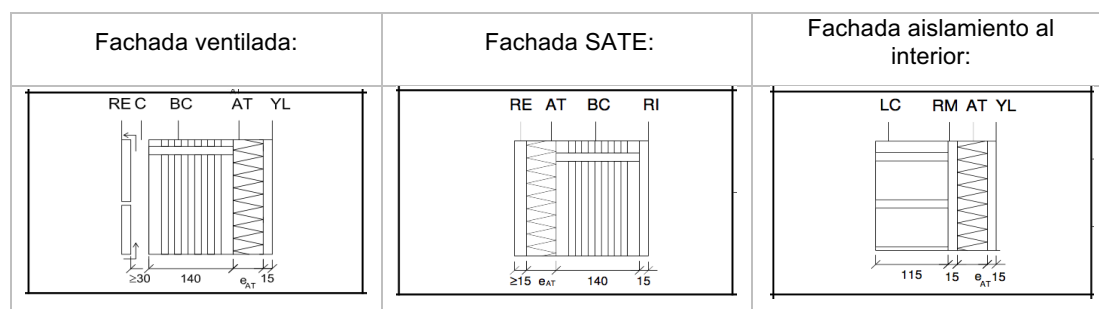
El impacto ambiental dependerá en primer lugar de la localización geográfica del estudio, que definirá las zonas climáticas y por tanto las exigencias fijadas por el CTE [19]. Para el caso de estudio seleccionado esta variable se considera fija, ya que el AMB pertenece en todo su conjunto a la zona climática “C”.

### 2.2.3 Tipo de solución constructiva

El estudio selecciona las siguientes soluciones constructivas de rehabilitación de fachadas: sistema de Fachada Ventilada (FV), Sistema Aislamiento Térmicos por el Exterior (SATE), y Aislamiento por el Interior del Edificio (AIE) por ser no invasivas y permitir la ejecución de obra sin interrumpir el uso del edificio. Además, estas son las soluciones más comunes en España. También, estos tipos de fachada incrementan el aislamiento térmico y en el caso de FV y SATE eliminan los puentes térmicos, mientras que AIE facilita la rehabilitación individual de un inmueble en el caso de estar este integrado en un edificio de vivienda colectiva. Hay que tener en cuenta que este último tipo de rehabilitación puede modificar las condiciones de habitabilidad actuales de la vivienda, al reducir la superficie interior de las estancias donde se instala [27].

El estudio selecciona las siguientes soluciones constructivas de rehabilitación cubiertas: sistema de cubierta plana invertida, un sistema de cubierta inclinada invertida y un sistema de cubierta inclinada ventilada, todas ellas no invasivas, resultando ser las más comunes en España.

La Figura 4 y la Figura 5 muestran los detalles constructivos de los sistemas seleccionados según el Catálogo de Elementos Constructivos del Código Técnico de la Edificación de España [28].



**Figura 4. Descripción de las soluciones constructivas de fachada escogidas**

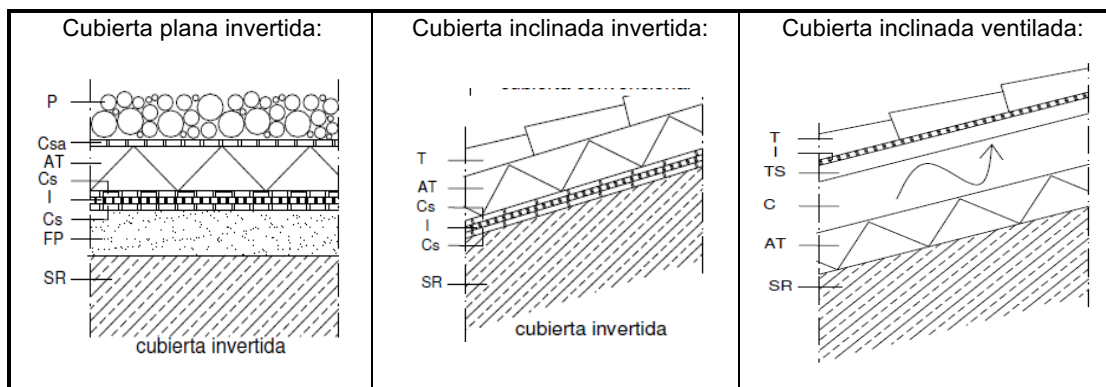


Figura 5. Descripción de las soluciones constructivas de cubierta escogidas

#### 2.2.4 Tipo de aislamiento térmico

Dos tipos de aislamiento térmico se han incluido en el estudio: poliestireno expandido (EPS), por ser uno de los más usados en España; y corcho, como un material natural, ya que el 85% de su producción se concentra en la Península Ibérica [23].

#### 2.2.5 Año de construcción de los edificios

El Código Técnico de la Edificación español establece la transmitancia térmica máxima  $U=0,29$  ( $W/m^2 K$ ) para fachadas de edificios de nueva planta localizados en zona climática "C", que corresponde a la zona climática del AMB, mientras que para el caso de cubiertas este valor se establece como  $U=0,23$  ( $W/m^2 K$ ) [19]. Este valor es el que se denomina  $U_{objetivo}$ , ya que corresponde al estándar actual al que deben aspirar los edificios a rehabilitar.

La transmitancia térmica media de los edificios existentes en España se obtiene de los datos proporcionados por el IDAE [17] para la zona climática del AMB, y depende del año de construcción de la vivienda y del tipo de elemento de estudio: cubiertas y fachadas en nuestro caso tal como muestra la Tabla 1.

Tabla 1. Valores de transmitancia estimadas y objetivos para zona climática "C", según año de construcción de viviendas.

Variable	U existente estimada ( $W/m^2K$ )	U objetivo ( $W/m^2K$ )	
Fachadas	Construido antes de 1981	3,00	
	Construido entre 1981 - 2007	1,80	0,29
	Construido entre 2008-2014	0,73	
Cubiertas	Construido antes de 1981 - Plana	2,50	
	Construido antes de 1981 - Inclinada	3,80	
	Construido entre 1981 - 2007	1,40	0,23
	Construido entre 2008-2014	0,41	

## 3. Resultados y discusión

### 3.1 Caracterización del parque de viviendas

Una primera aproximación a escala supramunicipal ha permitido caracterizar la superficie envolvente en función de la edad de construcción de la edificación por municipios. Los resultados permiten observar la segregación y concentración territorial

que se produce. Principalmente se pueden distinguir dos tipos de municipios: los núcleos clásicos que concentran una gran cantidad de superficie envolvente anterior a 1981, en torno al municipio de Barcelona, y una corona de municipios metropolitanos construidos entre 1981 y 2007 en torno a pequeños cascos históricos.

Teniendo en cuenta estos datos, resulta relevante observar la caracterización morfológica (Tabla 2 y Figura 6). En gran medida, las edificaciones más antiguas corresponden a morfologías de vivienda colectiva: tejidos históricos, ensanches, y bloques. Los municipios que experimentaron un mayor crecimiento entre 1981 y 2007 se caracterizan por tejidos de vivienda unifamiliar.

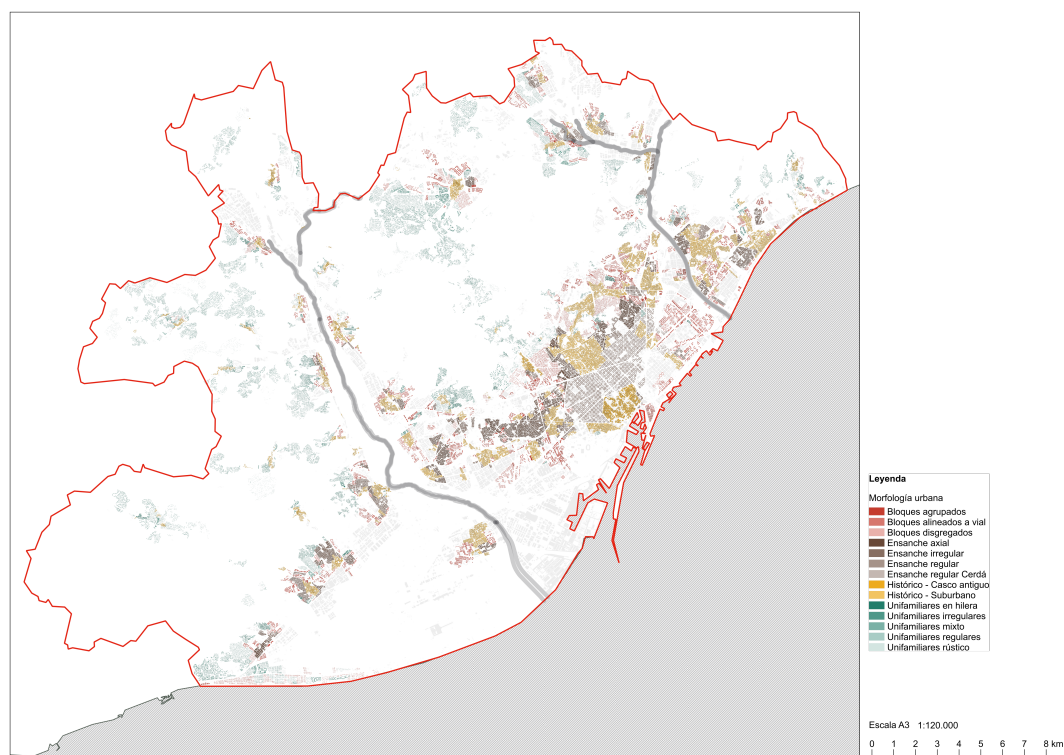


Figura 6. Mapa de morfología urbana

Tabla 2. Porcentaje de superficie envolvente según morfología urbana por municipio (resumen)

	Bloques	Ensanche	Histórico	Unifamiliares
Badalona	28%	21%	46%	5%
Begues			8%	92%
Castellbisbal	7%	3%	23%	67%
Castelldefels	30%	16%		54%
Cervelló	1%		11%	88%
Corbera de Llobregat	4%		8%	88%
Cornellà de Llobregat	36%	42%	22%	
Esplugues de Llobregat	18%	50%	10%	22%
Gavà	33%	34%	18%	16%
L'Hospitalet de Llobregat	26%	46%	28%	0%
Molins de Rei	21%	6%	49%	25%
Montcada i Reixac	15%	27%	24%	34%
Montgat	43%	0%	33%	24%
Pallejà	24%		20%	56%
El Papiol	10%		38%	51%
El Prat de Llobregat	33%	12%	53%	1%
Ripollet	23%	39%	33%	4%
Sant Adrià de Besòs	56%	37%	7%	
Sant Andreu de la Barca	46%	11%	14%	30%
Sant Boi de Llobregat	22%	43%	20%	15%
San Climent de Llobregat			79%	21%
Sant Cugat del Vallès	27%	4%	10%	58%
Sant Feliu de Llobregat	41%	22%	34%	3%
Sant Joan Despí	41%	21%	27%	10%
Sant Just Desvern	16%	5%	19%	59%

	Bloques	Ensanche	Histórico	Unifamiliares
Santa Coloma de Cervelló	16%		29%	54%
Santa Coloma de Gramenet	11%	31%	52%	6%
Barberà del Vallès	24%	23%	17%	37%
Sant Vicenç dels Horts	13%	8%	17%	63%
Cerdanyola del Vallès	20%	14%	10%	56%
Tiana	14%		23%	63%
Torrelles de Llobregat			18%	82%
Viladecans	22%	44%	10%	25%
Badia del Vallès	100%			
La Palma de Cervelló	5%		36%	60%
Barcelona	23%	39%	34%	4%

> 75 %	> 50 %	> 25 %	> 0 %
--------	--------	--------	-------

## 3.2 Soluciones constructivas más sostenibles

### 3.2.1 Fachadas

Se ha calculado el Análisis del Ciclo de Vida de 1 m<sup>2</sup> de rehabilitación de fachada. La Tabla 3 muestra las categorías de impacto GWP (kg CO<sub>2</sub> –eq) y EE (MJ). Como puede verse, el tipo de solución constructiva resulta un factor relevante: el sistema SATE tiene menos impacto medioambiental que la Fachada Ventilada y el Aislamiento Térmico por el Interior. Teniendo en cuenta el material del aislamiento térmico, la gráfica muestra como el corcho puede ser una solución mejor observando los resultados de GWP en todas las soluciones constructivas. Sin embargo, es una solución peor si se analiza la Energía Embebida. En este caso, al tener en cuenta el carbón biogénico contenido del corcho se pone de manifiesto la idea de que el uso de materiales renovables no necesariamente representa una mejora general medioambiental y saca a la luz la necesidad de optimizar el procesado del material para mejorar sus impactos medioambientales. Como puede verse en la gráfica, el año de construcción también es un factor importante. El impacto medioambiental tiende a decrecer a medida que las regulaciones térmicas entran en vigor.

**Tabla 3. Impactos medioambientales de 1 m<sup>2</sup> de rehabilitación de fachada**

		periodo	hasta 1981		1981-2007		2008-2014	
		tipo de aislamiento térmico	EPS	Corcho	EPS	Corcho	EPS	Corcho
Tipo de rehabilitación de fachada	SATE	GWP (kg CO <sub>2</sub> eq)	35,93	60,77	35,00	58,04	31,61	48,04
		GWP biogénico (kg CO <sub>2</sub> eq)	35,93	14,79	35,00	15,39	31,61	17,62
		Energía Embebida (MJ)	586,49	906,05	562,03	858,41	472,39	683,82
	Fachada Ventilada	GWP (kg CO <sub>2</sub> eq)	39,23	63,44	38,30	60,71	34,91	50,71
		GWP biogénico (kg CO <sub>2</sub> eq)	39,23	18,63	38,30	19,24	34,91	21,46
		Energía Embebida (MJ)	964,48	1275,85	940,02	1228,21	850,38	1053,63
	Aislamiento Térmico por el Interior	GWP (kg CO <sub>2</sub> eq)	42,00	65,72	41,07	62,99	37,68	52,99
		GWP biogénico (kg CO <sub>2</sub> eq)	42,00	21,81	41,07	22,42	37,68	24,64
		Energía Embebida (MJ)	774,07	1079,18	749,61	1031,54	659,97	856,96

### 3.2.2 Cubiertas

Se ha calculado el Análisis del Ciclo de Vida de 1 m<sup>2</sup> de rehabilitación de cubierta. La Tabla 4 muestra las categorías de impacto GWP (kg CO<sub>2</sub> –eq) y EE (MJ). Como puede verse, el tipo de solución constructiva es un factor relevante: La cubierta plana en comparación con las dos inclinadas posee un GWP más alto, debido a que utiliza menos materiales naturales (los rastreles de madera de las cubiertas inclinadas mejoran esta categoría, al tener en cuenta el GWP biogénico, y ser estos materiales naturales capaces de fijar CO<sub>2</sub>). Sin embargo, los resultados en Energía Embebida mejoran considerablemente, ya que el uso de estos materiales no garantiza una manufacturación del material más sostenible. Para el caso de las cubiertas inclinadas, se observa como la cubierta invertida no ventilada funciona siempre mejor que la ventilada, ya que los paneles de madera que se instalan por encima de la cámara de

aire en el caso de la cubierta ventilada, aumentan considerablemente los niveles de impacto.

**Tabla 4. Impactos medioambientales de 1 m<sup>2</sup> de rehabilitación de cubierta**

periodo		hasta 1981		1981-2007		2008-2014		
material de aislamiento térmico		EPS	Corcho	EPS	Corcho	EPS	Corcho	
Solución constructiva de rehabilitación de cubierta	Cubierta plana	GWP (kg CO2 eq)	24,18	55,59	22,87	51,74	15,68	30,56
		GWP biogénico (kg CO2 eq)	24,18	-2,56	22,87	-1,70	15,68	3,02
		Energía embebida (MJ)	662,75	1066,87	628,15	999,49	438,30	629,72
	Cubierta inclinada	GWP (kg CO2 eq)	80,55	113,31	78,67	107,76	71,46	86,52
		GWP biogénico (kg CO2 eq)	-3,05	-30,71	-4,94	-29,50	-12,14	-24,85
		Energía embebida (MJ)	2712,79	3134,67	2663,07	3037,67	2473,00	2666,84
	Cubierta inclinada ventilada	GWP (kg CO2 eq)	65,23	96,98	63,35	91,44	56,16	70,26
		GWP biogénico (kg CO2 eq)	5,10	-21,91	3,22	-20,68	-3,97	-15,97
		Energía embebida (MJ)	3554,52	3962,94	3504,86	3866,21	3315,00	3496,41

### 3.3 Impactos a escala AMB

Conocidos los m<sup>2</sup> de superficie envolvente caracterizada según año de construcción y morfología urbana y los impactos al m<sup>2</sup> de soluciones constructivas, se realiza una extrapolación de ambos resultados de forma directa o mediante la valoración de escenarios de rehabilitación.

#### 3.3.1 Extrapolación directa

La extrapolación directa indica la magnitud de los impactos ambientales a esta escala territorial. Los resultados calculados muestran diferencias entre impactos de soluciones constructivas de fachada con diferencias de hasta casi 2.000 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> eq.<sup>iii</sup>, siendo el escenario de menor impacto el uso de SATE con EPS, y el de mayor impacto el uso de aislamiento por el interior con corcho. En el caso de las cubiertas la diferencia es de 2.500 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> eq., siendo una diferencia relativa del 400% entre la solución menos impactante y la más impactante (la cubierta plana con EPS frente a la cubierta inclinada ventilada con corcho respectivamente).

Una vez demostrada la importancia que puede tener a una escala territorial la elección de soluciones constructivas menos impactantes en un contexto de transición hacia una economía baja en carbono, conviene conocer, en términos relativos, cual es la morfología más impactante (

Tabla 5).

Los resultados muestran como la morfología es, sin duda, un factor clave sobre el que caracterizar la edificación, obteniendo diferencias de hasta un 574% más superficie envolvente por vivienda. Se observa, como es lógico, cómo lo más compacta y continua que es una forma, la menor superficie envolvente que desarrolla. En el caso de la edificación en bloque, tanto agrupados como alineados a vial se comportan de un modo similar, frente a los disgregados. El ensanche, es la trama que menos impactos ambientales produciría en su rehabilitación, seguido de la edificación en bloque. Los tejidos de vivienda unifamiliar se caracterizan por una gran diferencia en términos relativos frente a la vivienda colectiva.

Tabla 5. Relación entre superficie Envolvente y vivienda según morfología urbana

Morfología		Superficie Envolvente / vivienda (m <sup>2</sup> /vivienda)
<b>Bloque</b>		
B1	Agrupados	57
B2	Alineados a vial	58
B3	Disgregados	119
<b>Ensanche</b>		
E1	Axial	67
E2	Irregular	60
E3	Regular Cerdá	63
E4	Regular	63
<b>Histórico</b>		
H1	Casco Antiguo	91
H2	Suburbano	73
MEDIA VIVIENDA COLECTIVA		67
<b>Unifamiliar</b>		
U1	En hilera	165
U2	Irregular	330
U3	Mixto	190
U4	Regular	282
U5	Rústico	325
MEDIA VIVIENDA UNIFAMILIAR		260
	máximo	330
	mínimo	57
	diferencia absoluta	272
	diferencia relativa	574%

### 3.3.2 Extrapolación mediante escenarios

La extrapolación mediante escenarios tiene en cuenta la capacidad real de un material natural como el corcho para su uso como aislante en la rehabilitación de viviendas.

Para su realización se parte de los trabajos realizados por J. Boschmonart-Rives et al. [29], que caracterizan la producción de corcho en el Sur de Europa. Además, J. Sierra-Pérez [30], ha investigado en el mercado del mismo, contabilizando en dichos estudios que hasta 7.600 toneladas de material bruto extraído de los bosques de corcho de Cataluña son potencialmente utilizables. Esto supone el 50% de la capacidad de los bosques de Cataluña [31].

El escenario planteado obtiene la capacidad del corcho de los datos anteriormente descritos. Aunque en la realidad los paneles de corcho como aislante de construcción se obtienen de los desechos de la fabricación de tapones de corcho natural para la industria del vino y el cava [32], no existen estudios hasta la fecha que contabilicen las toneladas que se obtendrían de la reutilización de los desechos, aunque si se conoce que actualmente sólo se aprovecha el 20% del material bruto extraído [33].

En la consideración del escenario se toman por tanto la producción de corcho de 7.600 toneladas de corcho anualmente. Además, conociendo las superficies de fachada y cubierta totales por morfología y fecha de construcción, se calcula los kilos de corcho necesarios para la rehabilitación de cada morfología teniendo en cuenta los datos que relacionan kg/m<sup>2</sup> obtenidos durante la realización del trabajo. Se tiene en cuenta la solución constructiva menos impactante de corcho (SATE para el caso de las fachadas, e inclinada en el caso de las cubiertas).

Posteriormente se calcula la cantidad anual que podría rehabilitarse con las soluciones constructivas de corcho seleccionadas, y se obtiene el número de años que se tardaría en completar el 100% de la rehabilitación.

Como puede observarse en la Figura 7 hay morfologías que requieren de una gran cantidad de tiempo para rehabilitarse con corcho según la capacidad actual de la industria, requiriendo de una estrategia de rehabilitación a largo plazo que tenga en cuenta estas posibilidades (Las morfologías más antiguas de tejido Histórico Suburbano, o los barrios en Bloque Agrupados, así como también los Ensanches tanto irregulares como el de Cerdá). Sin embargo, otros pueden realizarse en tiempo inferior

incluso a un año, si bien es cierto que la mayoría corresponde a las morfologías construidas más recientemente.

Es conveniente señalar que esta metodología puede ser útil en la toma de decisiones políticas, al plantear escenarios de rehabilitación y regeneración urbana. De hecho, ayudaría a la toma de decisiones la relación de estos resultados con otros datos que faciliten la toma de decisiones en la priorización de la rehabilitación del parque edificado, como por ejemplo criterios de vulnerabilidad urbana (sociodemográfica, socioeconómica, ...).

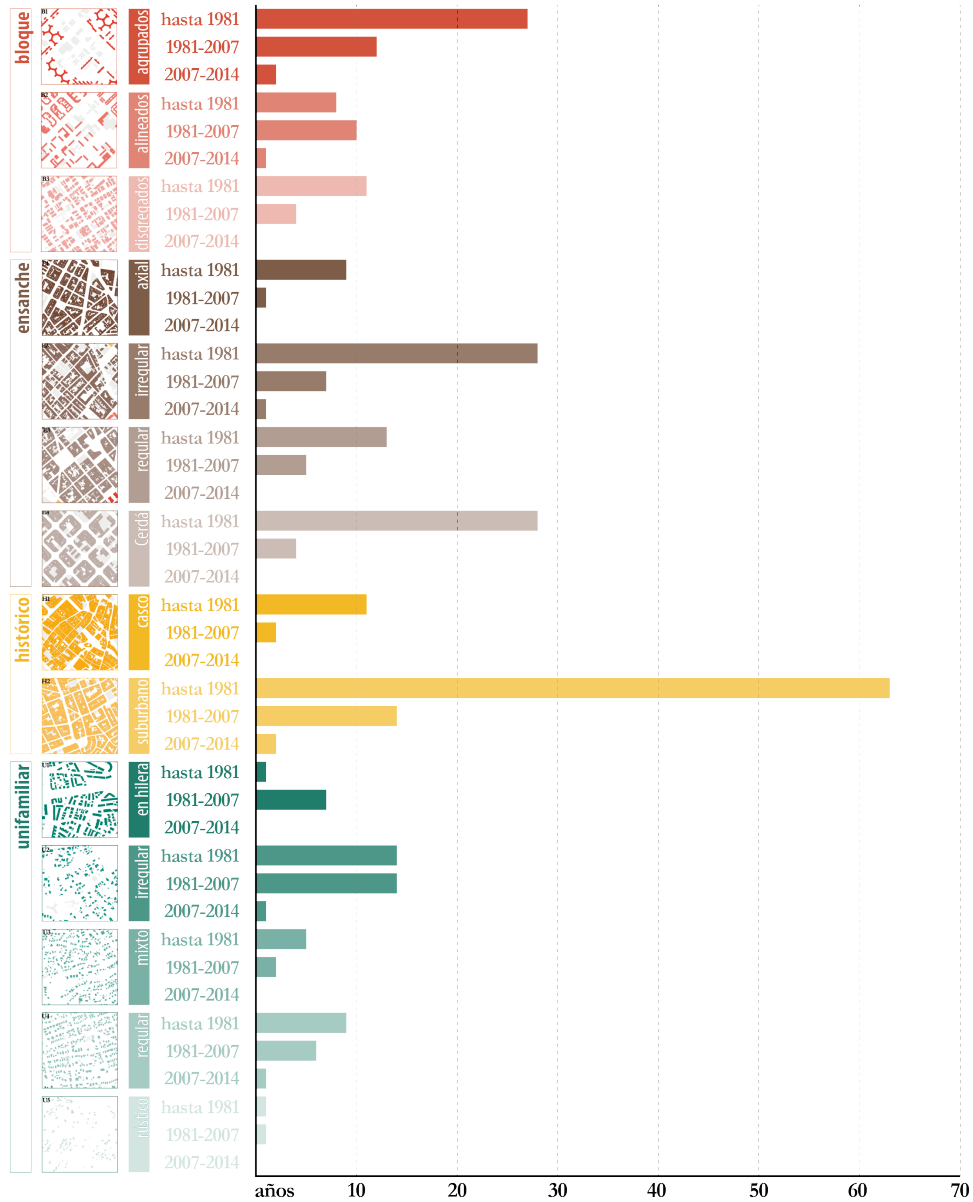


Figura 7. Escenario de rehabilitación. Producción de 7.600 toneladas de corcho / año

---

## 5. Conclusiones

---

La presente investigación ha permitido:

- Obtener nuevas metodologías de caracterización residencial a través de metodologías *bottom-up*, con una aproximación edificio a edificio.

El método de trabajo planteado resulta fácilmente actualizable, ya que se basa en datos abiertos, frente a otras metodologías que dependen de los Censos decenales de Población y Viviendas, con una escala mínima de trabajo mayor a la planteada (la sección censal). Además, el trabajar en la escala de edificación frente a la sección censal permite reagrupar la información en unidades más acordes a la realidad física de la ciudad, como puede ser la morfología urbana, tenida en cuenta en este estudio.

- Conocer el impacto ambiental de las soluciones constructivas tipo de rehabilitación, teniendo en cuenta diversos materiales aislantes.

Es conveniente remarcar que las soluciones a priori más sostenibles pueden no serlo, como se ha confirmado en el estudio. Los datos obtenidos acentúan las altas posibilidades que posee el corcho como material aislante en el sector de la construcción, aunque la industria debería mejorar hacia una mayor eficacia de los procesos de fabricación, reduciendo el consumo energético que se produce en los mismos.

- Conocer las magnitudes del impacto de rehabilitación energética de las envolventes en una escala territorial.

Como se ha visto anteriormente, las diferencias de magnitud en la extrapolación directa a los diferentes escenarios considerados, manifiesta que la elección de una solución menos impactante frente a otra de mayor impacto es importante a escala territorial, consiguiendo minimizar gran cantidad de los impactos. Esto puede ayudar a la creación de políticas de rehabilitación, que tengan en cuenta el Análisis del Ciclo de Vida.

Durante el transcurso de esta investigación se han detectado posibles líneas de investigación que derivan de esta aproximación preliminar.

La línea de trabajo más directa sería la ampliación del ACV a otras fases de vida, como la etapa de uso y fin de vida. Esto supondría realizar modelos de consumo energético, en los que podría relacionarse consumo con ahorro, pudiendo obtener retornos de inversiones para conocer de forma más certera la idoneidad (o no) de la intervención. Además, analizar la energía operativa sería útil para conocer si la solución constructiva mejora las implicaciones ambientales durante esta etapa.

Así mismo podrían realizarse más investigaciones acerca de los materiales aislantes. En la actualidad existen muchos materiales en el mercado, incluso algunos muy novedosos, cuyo ACV todavía no se ha realizado.

Por otra parte, sería conveniente realizar un análisis económico de las soluciones constructivas elegidas, así como realizar su extrapolación con la escala urbana. Además, relacionando dichos resultados con los impactos generados, puede obtenerse una idea más amplia de la sostenibilidad en su conjunto (medioambiental, económica y social).

Para la valoración de escenarios, pueden relacionarse los datos obtenidos con otros desarrollados sobre vulnerabilidad urbana, pudiendo ser, el estudio realizado, un indicador más desde la perspectiva energética en la detección de la vulnerabilidad urbana. Así mismo, debería estudiarse más a fondo la capacidad del corcho en el mercado de la construcción, obteniendo datos fiables que permitan conocer la cantidad de toneladas que se podrían producir en el reciclaje de los desechos de los tapones de corcho.

Por último, se está empezando a trabajar en la comparación de la metodología presentada en esta investigación con la desarrollada en Luxemburgo por Mastrucci et al. [13], esperando obtener conclusiones que ayuden a trabajar en esta línea dentro del territorio europeo.

---

## 6. Bibliografía

---

- [1] European Comission. 2010. "Regulation of the European Parliament and of the council. Establishing Horizon 2020 - The Framework Programme for Research and Innovation". Brussels.
- [2] UN - Population Division. 2015. *World Population Prospects: The 2015 Revision, World Population 2015 Wallchart*.
- [3] Rode, P., y Burdett, R. 2011. "Cities: Investing in energy and resource efficiency.". En , 11:453–492.
- [4] Ministerio de Fomento, Instituto Juan de Herrera, y Departamento de Urbanística y Ordenación del Territorio IJH/ETSAM. 2013. *Análisis de las características de la edificación residencial en España (2001)*. Madrid.
- [5] Hernández Aja, A., Matesanz Parellada, Á., García Madruga, C., Alguacil Gómez, J., Camacho Gutiérrez, J., y Fernández Ramírez, C. 2015. *Atlas de Barrios Vulnerables de España: 12 Ciudades 1991/2001/2006*. Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- [6] Cuchi, A., y Sweatman, P. 2011. "Una visión-país para el sector de la edificación en españa": 70.
- [7] Cuchi, A., y Pages, A. 2007. *Sobre una estrategia para dirigir al sector de la edificación hacia la eficiencia en la emisión de gases de efecto invernadero*. Madrid: Ministerio de Vivienda.
- [8] Rodrigues, C., y Freire, F. 2014. "Integrated life-cycle assessment and thermal dynamic simulation of alternative scenarios for the roof retrofit of a house". *Building and Environment* 81: 204–215. doi:10.1016/j.buildenv.2014.07.001.
- [9] Pombo, O., Allacker, K., Rivela, B., y Neila, J. 2016. "Sustainability assessment of energy saving measures: a multi-criteria approach for residential buildings retrofitting—A case study of the Spanish housing stock". *Energy and Buildings* 116: 384–394. doi:10.1016/j.enbuild.2016.01.019.
- [10] Rives, J. 2011. "Environmental evaluation of the cork sector in southern Europe (Catalonia)". Tesis doctoral dirigida por X. Gabarrell y J. Rieradevall. Barcelona: Universitat Autònoma de Barcelona.
- [11] Sierra-Pérez, J. 2016. "The introduction of eco-design for promoting the use of eco-materials: the cork as building material". Tesis doctoral dirigida por X. Gabarrell y J. Boschmonart-Rives. Barcelona: Universitat Autònoma de Barcelona.
- [12] Swan, L.G., y Ugursal, V.I. 2009. "Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13: 1819–1835. doi:10.1016/j.rser.2008.09.033.
- [13] Mastrucci, A., Popovici, E., Marvuglia, A., De Sousa, L., Benetto, E., y Leopold, U. 2015. "GIS-based Life Cycle Assessment of urban building stocks retrofitting- a bottom-up framework applied to Luxembourg". En *Proceedings of EnviroInfo and ICT for Sustainability 2015*, 47–56. Paris, France: Atlantis Press. doi:10.2991/ict4s-env-15.2015.6.
- [14] Direcció de Serveis Ambientals de l'AMB. 2015. *Anàlisis dels Teixits Urbans del L'AMB*. Barcelona: AMB.
- [15] Dirección General del Catastro. 2013. "Modelo de datos de cartografía vectorial (formato shapefile)".
- [16] Dirección General del Catastro. 2011. "Fichero informático de remisión de catastro (bienes inmuebles urbanos, rústicos y de características especiales)".

- [17] IDAE. 2012. *Guía IDAE: Manual de fundamentos técnicos de calificación energética de edificios existentes CE3X*. Book. Madrid.
- [18] Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. 1979. "Real Decreto 2429/79, de 6 de julio, por el que se aprueba la Norma Básica de la Edificación NBE-CT-79, sobre Condiciones Térmicas en los edificios".
- [19] Ministerio de Vivienda. 2013. "Documento Básico de Ahorro de Energía (DB-HE)". Madrid.
- [20] QGIS Development Team. 2015. "QGIS Geographic Information System". *Open Source Geospatial Foundation Project*.
- [21] Dirección General del Catastro. 2013. "Descarga y tratamiento de información alfanumérica en formato CAT. Manual del usuario".
- [22] Rodríguez-Soria, B., Domínguez-Hernández, J., Pérez-Bella, J.M., y del Coz-Díaz, J.J. 2015. "Quantitative analysis of the divergence in energy losses allowed through building envelopes". Article. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 49. Elsevier: 1000–1008. doi:10.1016/j.rser.2015.05.002.
- [23] Sierra-Pérez, J., Boschmonart-Rives, J., y Gabarrell, X. 2016. "Environmental assessment of façade-building systems and thermal insulation materials for different climatic conditions". *Journal of Cleaner Production* 113: 102–113. doi:10.1016/j.jclepro.2015.11.090.
- [24] European Committee for Standardization. 2014. "EN 15804:2012+A1, 2013. Sustainability of construction works - Environmental product declarations – Core rules for the product category of construction products".
- [25] PRé Consultants. 2010. *Simapro 7.3.0*. Amersfoort (Netherlands).
- [26] Ecoinvent. 2009. "ecoinvent database 3.1". *Swiss Centre for Life Cycle Inventories*.
- [27] Monzón, M., Daumal, F., y López-Mesa, B. 2015. "Condiciones de habitabilidad y rehabilitación acústica en la vivienda social de la posguerra español". En *46º Congreso español de acústica*, ed. Calvo-Manzano, A. y Pérez-López, A., 936–945. Valencia: Sociedad Española de Acústica -SEA-.
- [28] Ministerio de Vivienda, Instituto de Ciencias de la Construcción EduardoTorroja, y CSIC. 2008. "Catálogo de elementos constructivos del CTE": 141.
- [29] Rives, J., Fernandez-Rodriguez, I., Rieradevall, J., y Gabarrell, X. 2012. "Environmental analysis of raw cork extraction in cork oak forests in southern Europe (Catalonia--Spain)". *Journal of environmental management* 110: 236–45. doi:10.1016/j.jenvman.2012.06.024.
- [30] Sierra-Pérez, J., Boschmonart-Rives, J., y Gabarrell, X. 2015. "Production and trade analysis in the Iberian cork sector: Economic characterization of a forest industry". *Resources, Conservation and Recycling* 98: 55–66. doi:10.1016/j.resconrec.2015.02.011.
- [31] Tusell, J.M., y Garcia, R.M. 2008. *Gestió de la sureda: manual didàctic*. Santa Coloma de Farners: Consorci Forestal de Catalunya - Santa Coloma de Farners.
- [32] Sierra-Pérez, J., Boschmonart-Rives, J., Dias, A.C., y Gabarrell, X. 2016. "Environmental implications of the use of agglomerated cork as thermal insulation in buildings". *Journal of Cleaner Production* 126: 97–107. doi:10.1016/j.jclepro.2016.02.146.
- [33] Rives, J., Fernandez-Rodriguez, I., Rieradevall, J., y Gabarrell, X. 2011. "Environmental analysis of the production of natural cork stoppers in southern Europe (Catalonia – Spain)". *Journal of Cleaner Production* 19: 259–271. doi:10.1016/j.jclepro.2010.10.001.

<sup>i</sup> El cálculo se ha realizado teniendo en cuenta las viviendas principales y no principales en el ámbito nacional, según los datos del Censo de Población y Viviendas de 2011.

<sup>ii</sup> A excepción de País Vasco y Navarra que administrativamente no pertenecen a la Dirección General del Catastro.

<sup>iii</sup> Exactamente 1.853.095.249,46 kg CO<sub>2</sub> eq.