

# Treballs beneficiaris dels ajuts per al suport a la recerca en canvi climàtic a l'AMB

Valoració ambiental de la rehabilitació energètica de les zones menys eficients de l'AMB mitjançant ACV

Sergio García Pérez

---

## 1. Introducción

---

Estudios recientes señalan que el 75% de las emisiones de CO<sup>2</sup> del planeta se producen en las ciudades. Además, el 40% del consumo energético de la Unión Europea corresponde al sector de la edificación. Teniendo en cuenta que se espera que la población mundial que reside en áreas urbanas aumente en los próximos años, se justifica que el sector de la edificación de nuestras ciudades juega un papel importante en la transformación hacia un modelo económico bajo en carbono.

Al respecto, numerosos estudios han enfatizado en la necesidad de plantear una estrategia de rehabilitación del parque edificado, con el fin de mejorar tanto su eficiencia energética como la calidad de la vida de las personas que allí habitan.

Resultaría interesante entonces, por un lado, mejorar las técnicas que permitan conocer el estado actual del parque edificado, para disponer de datos más fácilmente actualizables y fiables que permitan diagnosticar y sistematizar estrategias de mejora y rehabilitación del parque edificado; y por otro conocer entre las soluciones posibles cuales resultan más sostenibles desde una perspectiva integral, teniendo en cuenta para ello, el análisis del ciclo de vida.

El objetivo principal de este trabajo es obtener las implicaciones ambientales de la rehabilitación de los edificios menos eficientes del Área Metropolitana de Barcelona (AMB), desde una escala territorial. Esto permite:

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

---

## 2. Metodología

---

La metodología planteada (Figura 1) se resume:

- En primer lugar, la caracterización de la envolvente térmica de la edificación del Área Metropolitana de Barcelona, a través de una metodología de abajo a arriba, más comúnmente denominado *bottom-up*, edificio a edificio, generando un modelo geoespacial basado en *open-data*, fácilmente actualizable para el contexto español.
- En segundo lugar, la evaluación de las soluciones constructivas tipo de rehabilitación de superficie envolvente (fachadas y cubiertas) más sostenibles a nivel ambiental, a través de la metodología de análisis del ciclo de vida desde una aproximación de la extracción a la puesta en uso.
- Por último, la extrapolación a nivel territorial de los resultados anteriormente descritos a todos los edificios localizados en los diferentes municipios que componen el AMB, a través de o bien una forma directa, o bien a través de escenarios de rehabilitación.

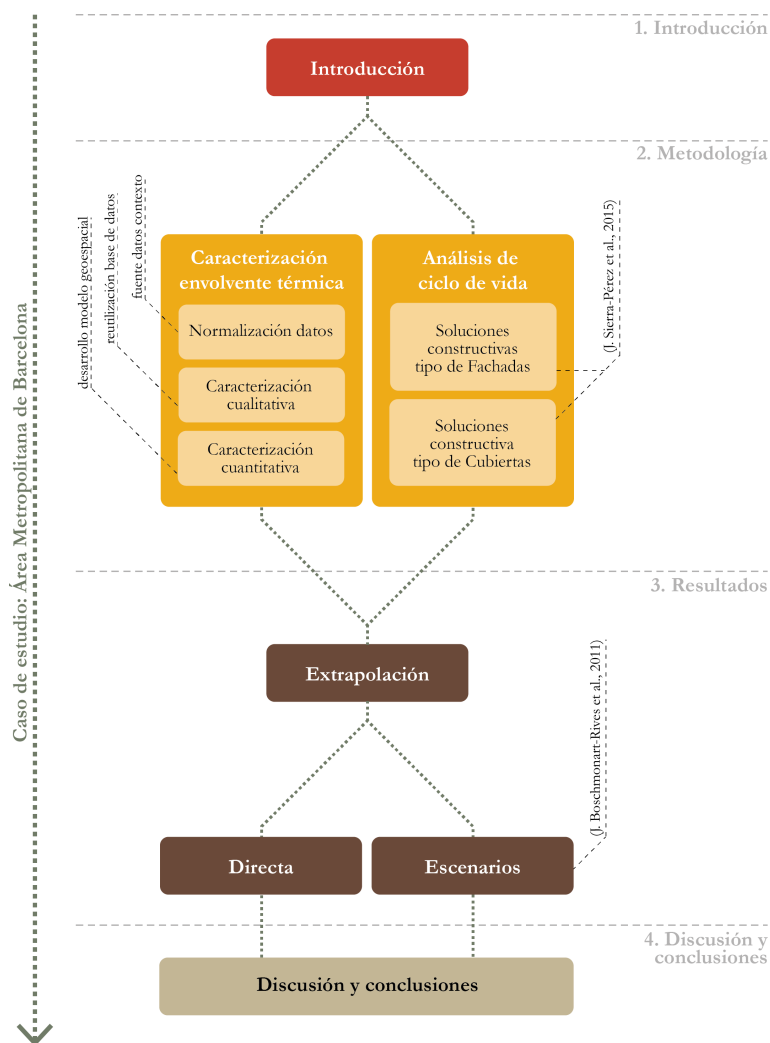


Figura 1. Esquema de metodología de trabajo empleada

## 2.1 Caracterización de la edificación

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, accesibles a todos los ciudadanos. 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 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 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 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.

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.

### 2.1.3 Caracterización cuantitativa

Se desarrolla un modelo geoespacial en QGIS usando los datos y cartografía de la Dirección General del Catastro. 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.

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.* 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.* sobre Análisis del Ciclo de Vida (ACV) para la cuantificación de implicaciones ambientales del aislamiento térmico en diferentes sistemas de fachadas, desde un enfoque desde la cuna al sitio (*cradle-to-site*), incluyendo la instalación en el edificio.

Para la realización del ACV se ha utilizado el software *Simapro 7.3* y la base de datos *Ecoinvent 3.1*. Las categorías de impacto ambiental incluidas en el estudio son el Potencial de calentamiento global (*Global Warming Potential: GWP*) por su relevancia en el ámbito ambiental, 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.

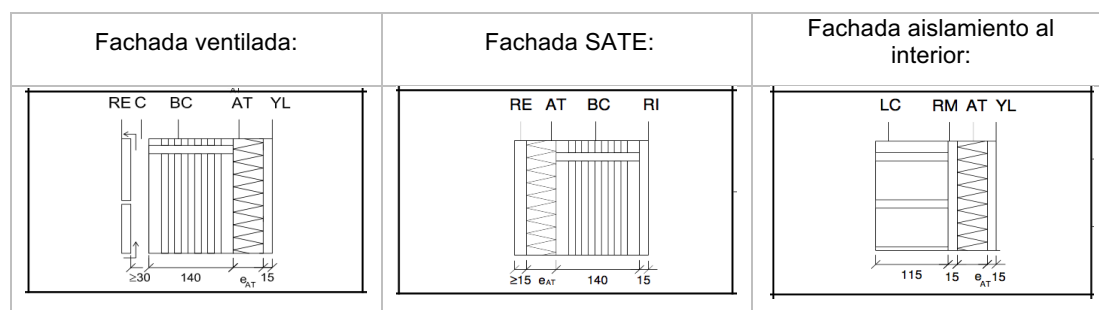
### 2.2.2 Localización geográfica

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. 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 la 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 (Figura 2).

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 (Figura 3).



**Figura 2. Descripción de las soluciones constructivas de fachada escogidas**

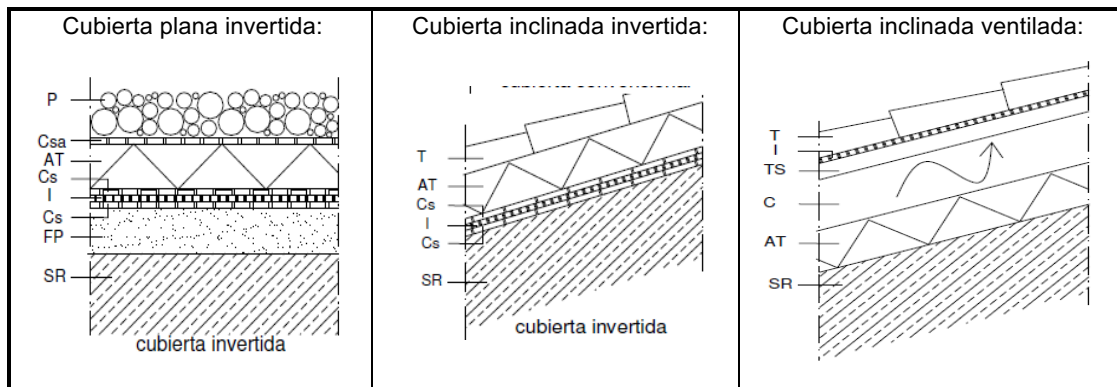


Figura 3. Descripción de las soluciones constructivas de cubierta escogidas

#### 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.

#### 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  $U=0,23$  ( $W/m^2 K$ ). 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 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.

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1 Caracterización del parque de viviendas

Los resultados de caracterizar la superficie envolvente en función de la edad de construcción de la edificación 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 (Figura 4). 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.

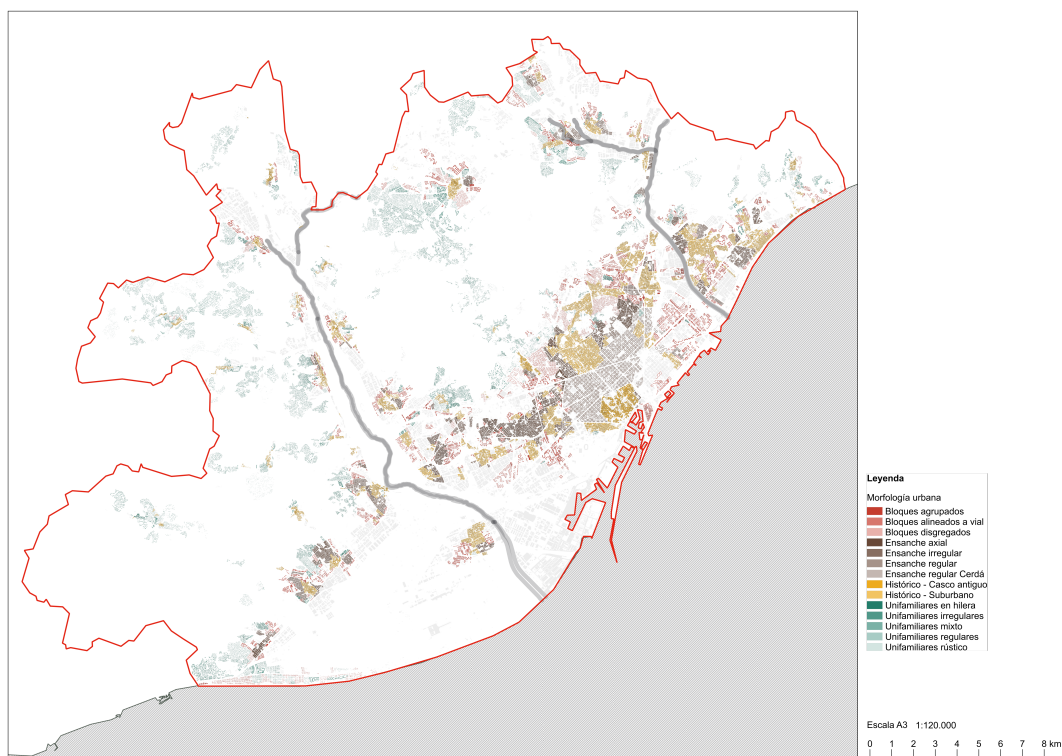


Figura 4. Mapa de morfología urbana

## 3.2 Soluciones constructivas más sostenibles

### 3.2.1 Fachadas

Se ha realizado el ACV de la rehabilitación de 1 m<sup>2</sup> de fachada. La Tabla 1 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 carbono 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, como parece lógico.

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

periodo		hasta 1981		1981-2007		2008-2014		
		EPS	Corcho	EPS	Corcho	EPS	Corcho	
Tipo de rehabilitación de fachada	SATE	GWP (kg CO2 eq)	35,93	60,77	35,00	58,04	31,61	48,04
		GWP biogénico (kg CO2 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 CO2 eq)	39,23	63,44	38,30	60,71	34,91	50,71
		GWP biogénico (kg CO2 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 CO2 eq)	42,00	65,72	41,07	62,99	37,68	52,99
		GWP biogénico (kg CO2 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 realizado el ACV de la rehabilitación de 1 m<sup>2</sup> de cubierta. La Tabla 2 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 carbono 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 2. 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 CO <sub>2</sub> eq)	24,18	55,59	22,87	51,74	15,68	30,56
		GWP biogénico (kg CO <sub>2</sub> 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 CO <sub>2</sub> eq)	80,55	113,31	78,67	107,76	71,46	86,52
		GWP biogénico (kg CO <sub>2</sub> 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 CO <sub>2</sub> eq)	65,23	96,98	63,35	91,44	56,16	70,26
		GWP biogénico (kg CO <sub>2</sub> 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., 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 3). 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 3. Relación entre superficie envolvente y nº de viviendas 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.

Investigaciones recientes han estudiado el mercado del sector del corcho, contabilizando en dichos artículos 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.

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, 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.

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 5 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 dicha toma la relación de estos resultados con otros datos desde dimensiones sociales o económicas (como por ejemplo criterios de vulnerabilidad urbana) que faciliten la priorización de la rehabilitación del parque edificado.

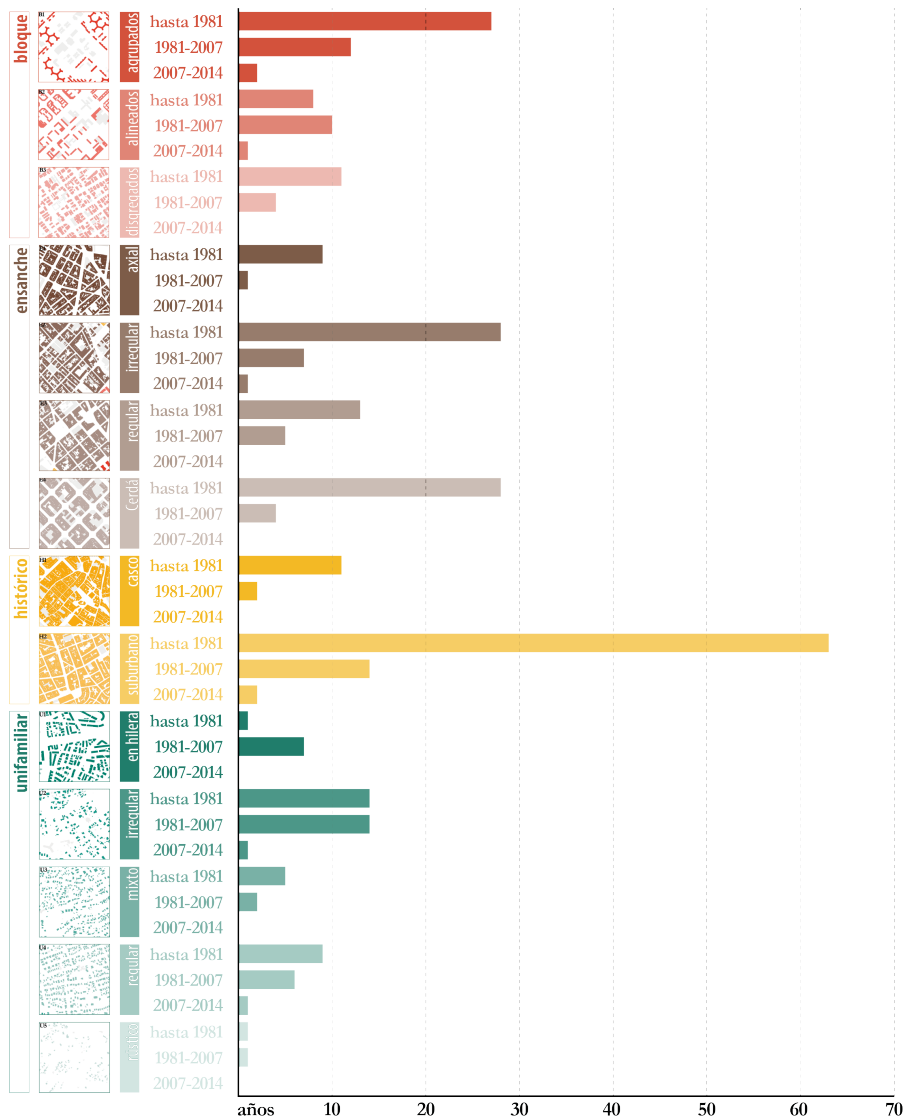


Figura 5. Escenario de rehabilitación. Producción de 7.600 toneladas de corcho / año

---

## 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 de Ciclo de Vida.