

Proceedings - Actas

22<sup>nd</sup> INTERNATIONAL CONGRESS  
ON PROJECT MANAGEMENT AND ENGINEERING

XXII CONGRESO INTERNACIONAL  
DE DIRECCIÓN E INGENIERÍA DE PROYECTOS

MADRID

11.07.2018

12.07.2018

13.07.2018



UNED

ETS de  
Ingenieros  
Industriales





# **Proceedings from the 22<sup>nd</sup> International Congress on Project Management and Engineering (Madrid, July 2018)**

**Comunicaciones presentadas al XXII Congreso Internacional de  
Dirección e Ingeniería de Proyectos, celebrado en Madrid del  
11 al 13 de julio de 2018**

AEIPRO

Asociación Española de Dirección e Ingeniería de Proyectos

02-009

## INFLUENCE OF THE CLIMATE ZONE IN THE SELECTION OF THERMAL INSULATION MATERIALS FROM AN ECO-EFFICIENCY PERSPECTIVE

Braulio-Gonzalo, Marta<sup>(1)</sup>; Bovea Edo, M<sup>a</sup> Dolores<sup>(1)</sup>; Ibáñez-Forés, Valeria<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup>Universitat Jaume I

The potential of thermal insulation materials in reducing the energy demand of buildings is key element in meeting the regulatory requirements for energy efficiency of buildings. Their thickness and thermal properties affect the thermal resistance of the building envelope, which depend on the climate zone where it is located.

This communication presents a methodology that allows to identify, from the environmental and economic point of view, the eco-efficiency of the use of insulation materials to meet the regulatory requirements in terms of energy savings established by the CTE and to compare the results for the different climatic zones of the Spanish territory. The methodology is applied to a single-family house in which a total of eleven thermal insulation materials are compared, both conventional and emerging derived from natural products, and five climatic zones with different winter climate severity.

**Keywords:** *thermal insulation; climatic zone; eco-efficiency; life cycle analysis; life cycle cost; energy demand*

## INFLUENCIA DE LA ZONA CLIMÁTICA EN LA SELECCIÓN DE MATERIALES DE AISLAMIENTO TÉRMICO DESDE UNA PERSPECTIVA DE ECO-EFICIENCIA

El potencial de los materiales de aislamiento térmico en la reducción de la demanda energética de los edificios resulta clave para cumplir con las exigencias normativas en materia de eficiencia energética. Su espesor y propiedades térmicas condicionan la resistencia térmica de la envolvente del edificio, que dependen de la zona climática donde se ubica.

Esta comunicación presenta una metodología que permite identificar, desde el punto de vista ambiental y económico, la ecoeficiencia del uso de materiales de aislamiento para cumplir las exigencias normativas en materia de ahorro de energía establecidas por el CTE y realizar una comparativa para las diferentes zonas climáticas del territorio español. La metodología se aplica a una vivienda unifamiliar en la que se comparan un total de once materiales de aislamiento térmico, tanto convencionales como emergentes derivados de productos naturales, y cinco zonas climáticas con diferente severidad climática de invierno.

**Palabras clave:** *aislamiento térmico; zona climática; eco-eficiencia; análisis de ciclo de vida; coste de ciclo de vida; demanda energética*

Correspondencia: M<sup>a</sup> Dolores Bovea Edo (bovea@uji.es)



©2018 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. Introducción

Desde la entrada en vigor del Código Técnico de la Edificación (CTE) en España, como consecuencia de la Directiva 2010/31/UE de eficiencia energética en los edificios, el uso de aislamiento térmico en la envolvente para reducir el consumo energético durante su etapa de uso, se ha visto generalizado. Los esfuerzos actualmente se encaminan a alcanzar el objetivo de diseñar y construir edificios de consumo de energía casi nulo, que generen el menor impacto ambiental posible.

El consumo de energía en la fase de uso del edificio disminuye con el incremento de espesor del aislamiento térmico en su envolvente (Bovea & Braulio-Gonzalo, 2017). Sin embargo, ello conlleva el uso de una mayor cantidad de material, por lo que el coste ambiental y económico del mismo también se ve incrementado. El espesor óptimo de aislamiento térmico para diferentes escenarios de reducción de la demanda energética ha sido analizado anteriormente teniendo en cuenta tanto la fase de construcción del edificio como la de uso (Braulio-Gonzalo & Bovea, 2017). No obstante, éste espesor también puede tener una gran variabilidad dependiendo de la zona climática en la que se ubica el edificio (Barrau, Ibañez & Badia, 2014; Schiavoni *et al.*, 2016; Sierra-Pérez, Boschmonart-Rives & Gabarrell, 2016), pues las exigencias normativas en materia de ahorro de energía aumentan notablemente cuando el clima es más severo en condiciones de invierno.

En este contexto, esta comunicación presenta una metodología que permite identificar, desde el punto de vista ambiental y económico, la ecoeficiencia del uso de materiales de aislamiento para cumplir las exigencias normativas en materia de ahorro de energía establecidas por el CTE y realizar una comparativa para las diferentes zonas climáticas del territorio español. La metodología se aplica a una vivienda unifamiliar en la que se comparan un total de once materiales de aislamiento térmico, tanto convencionales como emergentes derivados de productos naturales, y cinco zonas climáticas con diferente severidad climática de invierno.

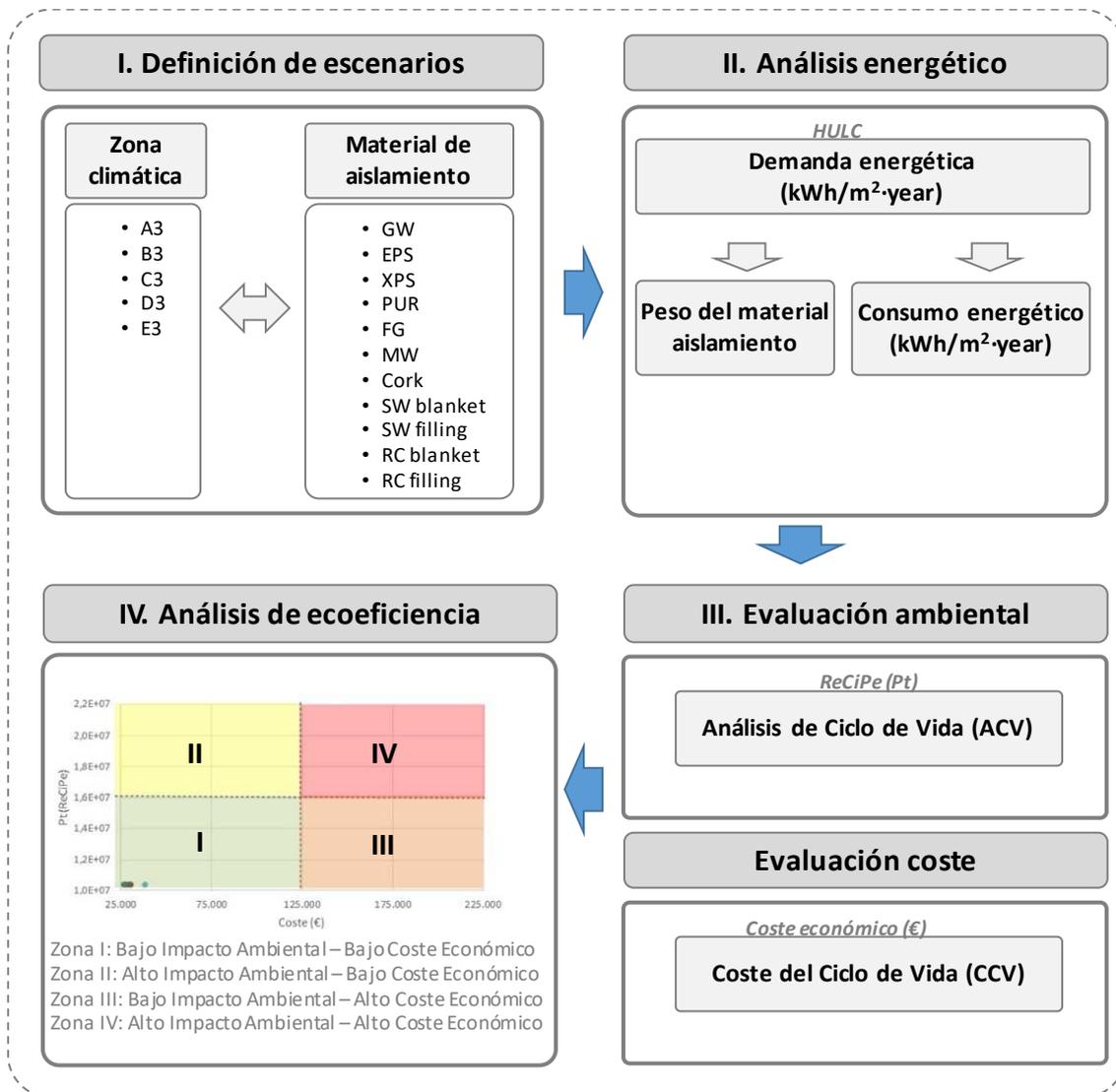
## 2. Metodología

La evaluación de la ecoeficiencia es una herramienta de gestión cuantitativa que permite el estudio de los impactos ambientales del ciclo de vida de un sistema del producto junto con el valor del sistema del producto para una parte interesada (ISO 14045, 2012).

Dentro de la evaluación de la ecoeficiencia, los impactos ambientales se evalúan utilizando el marco metodológico de la metodología de Análisis del Ciclo de Vida (ISO 14040-44, 2006). En el caso del valor del sistema, este estudio lo evalúa en función del coste, considerando el marco metodológico de la metodología de Coste del Ciclo de Vida (Davis Langdon Management Consulting, 2007).

La Figura 1 muestra la metodología que se propone con el fin de analizar cómo influye la zona climática a la hora de seleccionar el material de aislamiento térmico para la envolvente de un edificio (cubierta, fachada y suelo), con el fin de satisfacer la demanda energética del edificio exigida por el Código Técnico de la Edificación (CTE, 2013).

Figura 1. Esquema metodológico



En la **Etapa I** se definen los escenarios objeto de análisis, que surgen de combinar los diferentes materiales de aislamiento térmico (materiales convencionales, materiales naturales, etc.) para las diferentes zonas climáticas estacionales especificadas en el CTE. Cada zona climática viene definida por una severidad climática invierno (SCI) y una severidad climática de verano (SCV). La SCI da lugar a seis zonas climáticas definidas mediante una letra ( $\alpha$ , A, B, C, D y E) como indicador de su valor, el cual se calcula según la expresión que se muestra en la Tabla 1. A medida que la letra avanza desde la  $\alpha$  a la E, el clima es más frío en condiciones de invierno. La SCV da lugar a cuatro zonas climáticas denominadas por un número (1, 2, 3 y 4), cuyo valor se obtiene según la expresión también mostrada en la Tabla 1. La SCV aumenta a medida que aumenta el indicador.

**Tabla 1. Severidad climática de invierno (SCI) y de verano (SCV) de las zonas climáticas (CTE, 2013)**

Severidad climática de invierno (SCI)					
$SCI = a \cdot GD + b \cdot \frac{n}{N} + c \cdot GD^2 + d \cdot \left(\frac{n}{N}\right)^2 + e$					
$\alpha$	A	B	C	D	E
SCI ≤ 0	0 < SCI ≤ 0.23	0.23 < SCI ≤ 0.5	0.5 < SCI ≤ 0.93	0.94 < SCI ≤ 1.51	SCI > 1.51
Severidad climática de verano (SCV)					
$SCV = a \cdot GD + b \cdot GD^2 + c$					
1	2	3	4		
SCV ≤ 0.50	0.0 < SCV ≤ 0.83	0.83 < SCV ≤ 1.38	SCV > 1.38		

GD: grados día; n/N: cociente entre número de horas de sol y las máximas; a, b, c, d, e: coeficientes de regresión (CTE, 2013).

La Tabla 2 muestra las zonas climáticas existentes según las SCI y SCV en España.

**Tabla 2. Zonas climáticas en España según (CTE, 2013)**

		SCI					
		$\alpha$	A	B	C	D	E
SCV	4		A4	B4	C4		
	3	$\alpha 3$	A3	B3	C3	D3	
	2		A2	B2	C2	D2	
	1				C1	D1	E1

$\alpha 3$  y B2: Islas Canarias.

En la **Etapa II** se determina la resistencia térmica (R, m<sup>2</sup>·K/W) de los materiales de aislamiento necesaria para alcanzar la exigencia de demanda energética en cada una de las zonas climáticas. La demanda energética se calcula mediante la herramienta HULC (Universidad de Sevilla, 2013), que a su vez permite calcular el consumo de energía primaria (kWh/m<sup>2</sup>·año) durante la fase de uso del edificio.

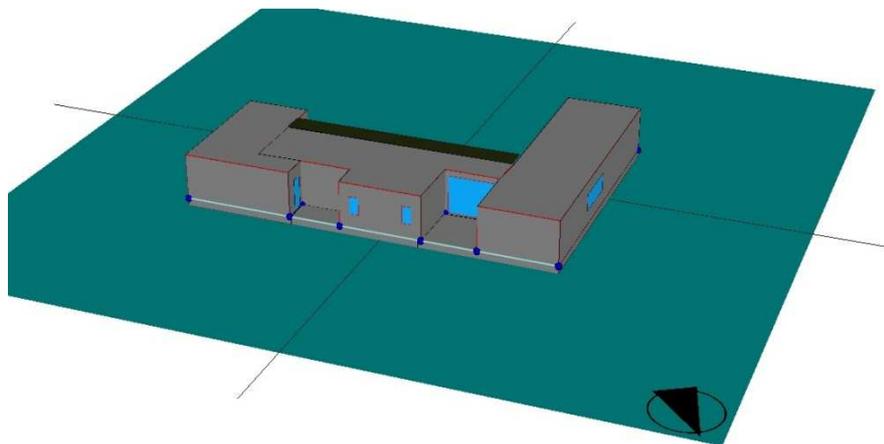
En la **Etapa III**, se calcula el impacto ambiental y económico de cada escenario. Para la obtención de los indicadores ambientales, es necesario completar un inventario del ciclo de vida de las etapas incluidas en el estudio a partir de datos primarios combinados con datos secundarios procedentes de bases de datos de reconocimiento internacional. Para la obtención de los indicadores económicos, es necesario considerar el coste unitario de cada elemento del ciclo de vida del edificio objeto de estudio, combinando precios obtenidos directamente de fabricantes con precios procedentes de bases de datos de precios.

Finalmente, en la **Etapa IV** se analiza la ecoeficiencia (ISO 14045, 2012) de cada escenario mediante un diagrama de doble entrada (impacto ambiental vs. coste económico), donde se identifican los mejores materiales de aislamiento térmico, para cada escenario, como aquéllos con un menor impacto ambiental y menor coste económico (ver Área I en la Figura 1).

### 3. Descripción del caso de estudio

La metodología descrita se aplica a una vivienda unifamiliar aislada, como caso de estudio. El edificio consta de una superficie construida de 278.40 m<sup>2</sup> distribuida en una planta. La geometría del edificio en 3D se muestra en la Figura 2.

Figura 2. Modelado 3D del caso de estudio (Fachadas NE-NO)

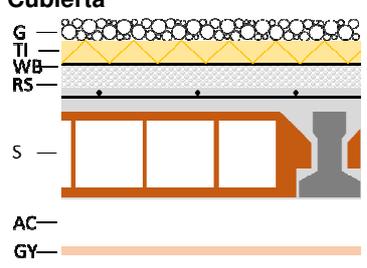


La envolvente térmica de la vivienda presenta las siguientes características. Nótese que la información correspondiente al aislamiento térmico no se ha descrito, ya que constituye la variable del estudio que depende del material aislante alternativo:

- **Cubierta.** Azotea no transitable invertida, realizada con:
  - Capa de 6 cm. de espesor medio de hormigón celular para formación de pendientes 1:7 formando pendientes comprendidas entre  $1 \leq p \leq 5\%$ .
  - Capa separadora con fieltro de fibra de vidrio de 100 gr/m<sup>2</sup>.
  - Impermeabilización con solución monocapa no adherida, tipo PN-1, con lamina tipo LBM-40-FV de betún modificado con elastómero SBS, de 40 gr/dm<sup>2</sup> masa total, con armadura constituida por fieltro de fibra de vidrio.
  - Capa separadora a base de fieltro sintético geotextil de 100 gr/m<sup>2</sup>.
  - Aislamiento térmico (capa objeto de estudio).
  - Capa filtrante con geotextil de iguales características iguales al anterior.
  - Capa de 5 a 6 cm de grava como protección pesada y lastre.

La cubierta del edificio tiene un valor de resistencia térmica R de 0,943 m<sup>2</sup>·K/W, sin considerar el aislamiento térmico, como muestra la Tabla 3.

**Tabla 3. Descripción de la cubierta del edificio y Resistencia térmica R (m<sup>2</sup>·K/W). Sin aislamiento térmico.**

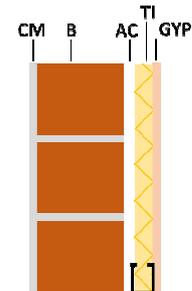
Descripción gráfica	Capa	Espesor (m)	$\lambda$ (W/m·K)	R (m <sup>2</sup> ·K/W)
	Rse	-	-	0.040
	G: Grava	0.050	2.000	-
	TI: Aislamiento térmico	-	-	-
	WB: Lámina impermeable	0.002	0.230	-
	RS: Hormigón celular (pendientes)	0.060	0.180	-
	S: Forjado unidireccional	0.300	2.000	-
	AC: Cámara de aire	0.100	-	0.180
	GY: Enlucido de yeso	0.012	0.250	-
	<b>Total</b>			<b>0.943</b>

• **Cerramientos.** Se componen de:

- Fachada:
  - . Muros de bloque de termoarcilla.
  - . Cámara de aire sin ventilar.
  - . Trasdosado de placas de cartón-yeso con aislante térmico (capa objeto de estudio).
  - . Enfoscado con mortero de cemento hidrófugo de 1,5 cm de espesor.
- Carpintería exterior
  - . Carpintería exterior de aluminio con rotura de puente térmico de aluminio (>12 mm).
  - . Doble acristalamiento formado por un vidrio de baja emisividad (0,03-0.1) de 6 mm de espesor, cámara de aire deshidratado de 4 mm con perfil separador de aluminio sellada perimetralmente y un vidrio laminado compuesto por dos vidrios de 3mm de espesor unidos mediante una lámina de butiral de polivinilo, con factor solar g=0,52-0,70 y transmitancia térmica 2,5 W/m<sup>2</sup>K.

La fachada cuenta con una R total de 1,265 m<sup>2</sup>·K/W, como muestra la Tabla 4.

**Tabla 4. Descripción de la fachada del edificio y Resistencia térmica R (m<sup>2</sup>·K/W). Sin aislamiento térmico.**

Descripción gráfica	Capa	Espesor (m)	$\lambda$ (W/m·K)	R (m <sup>2</sup> ·K/W)
	Rse	-	-	0.040
	CM: Mortero de cemento	0.020	0.550	-
	B: Ladrillo cerámico	0.240	0.296	-
	AC: Cámara de aire	0.010	-	0.150
	TI: Aislamiento térmico	-	-	-
	GYP: Panel de carón-yeso	0.024	0.250	-
	Rsi	-	-	0.130
	<b>Total</b>			<b>1.265</b>

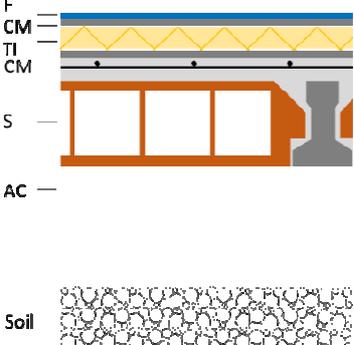
• **Suelo.**

- Forjado sanitario elevado:
  - . Pavimento cerámico tomado con mortero de cemento.
  - . Capa de mortero de regularización de 2 cm de espesor.
  - . Forjado unidireccional de hormigón armado con viguetas y bovedillas.
  - . Cámara de aire ventilada de 1 metro de altura, como separación del terreno.

El suelo de la vivienda tiene una R total es de 0,487 m<sup>2</sup>·K/W, como muestra la Tabla 5.

**Tabla 5. Descripción del suelo del edificio y Resistencia térmica R (m<sup>2</sup>·K/W). Sin aislamiento térmico.**

Descripción gráfica	Capa	Espesor (m)	λ (W/m·K)	R (m <sup>2</sup> ·K/W)
<b>Suelo</b>	Rse		-	0.170
F	F: Pavimento	0.008	1.900	
CM	CM: Mortero de cemento	0.020	0.550	
TI	TI: Aislamiento térmico	-	-	
CM	CM: Mortero de cemento	0.020	0.550	
S	S: Forjado unidireccional	0.300	2.000	
AC	AC: Cámara de aire ventilada	0.500	-	0.090
	Rsi		-	0.040
	<b>Total</b>			<b>0.487</b>



**4. Resultados**

A continuación se presentan los resultados que se obtienen de aplicar la metodología descrita en el apartado 2, al caso de estudio descrito en el apartado 3.

**Etapla I.** Los escenarios se configuran tras combinar:

- Materiales de aislamiento: fibra de vidrio (FV), lana mineral (LM), poliestireno expandido (EPS), poliestireno extrusionado (XPS), poliuretano (PUR), vidrio celular (VC), corcho (C), lana de oveja (LO) y algodón reciclado (AR), estos dos últimos en su versión manta (M) y relleno (R).
- Zonas climáticas: dado que este estudio aborda la influencia del aislamiento térmico en la reducción de la demanda energética de calefacción del edificio (kWh/m<sup>2</sup>·año), se toma como referencia la SCI, la cual da lugar a seis zonas climáticas (α, A, B, C, D y E), de las cuales se seleccionan las cinco correspondientes a las peninsulares (A, B, C, D y E), por ser su clima más crítico en condiciones de invierno. En cuanto a la SCV, se toma como referencia el intervalo 3, pues este existe para todas las zonas climáticas de invierno (A-D) excepto en el caso de la zona climática E, cuya única SCV posible es 1 (ver Tabla 2). Ello da como resultado un total de cinco zonas climáticas: A3, B3, C3, D3 y E1.

Teniendo en cuenta los once materiales de aislamiento térmico y las cinco zonas climáticas, se conforman un total de 11 x 5 = 55 escenarios.

**Etapla II.** Las simulaciones realizadas con HULC (Universidad de Sevilla, 2013) permiten calcular los valores de R requeridos para cada elemento de la envolvente (cubierta, fachada

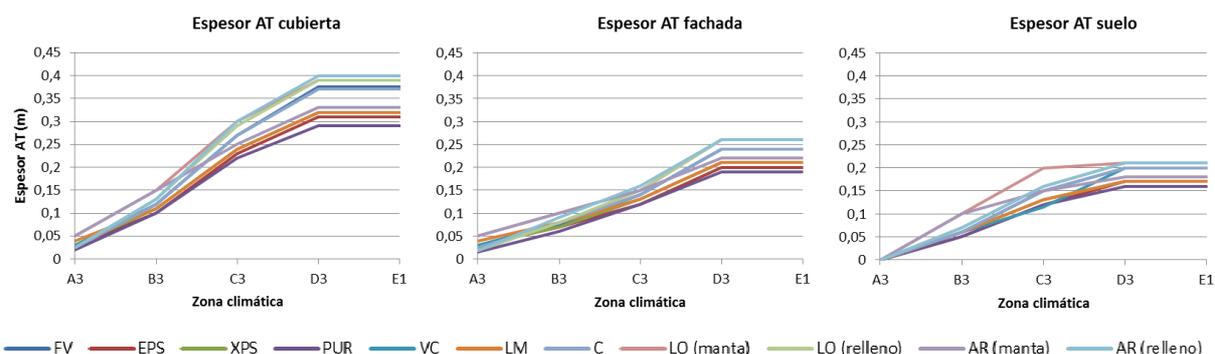
y suelo) para satisfacer los requerimientos de demanda energética de calefacción de cada uno de los escenarios. Estos valores son los presentados en la Tabla 6.

**Tabla 6. Valores de resistencia térmica ( $m^2K/W$ ) requeridos en cada zona climática para la cubierta, fachada y suelo**

Escenario	$R_{cubierta}$	$R_{fachada}$	$R_{suelo}$
A3	0.572	0.429	0.000
B3	2.900	1.860	1.480
C3	6.749	3.497	3.513
D3	9.057	5.878	4.766
E1	9.057	5.878	4.766

El espesor de aislamiento térmico necesario para cada una de las zonas climáticas y en cada uno de los elementos constructivos de cubierta, fachada y suelo, se muestra en la Figura 3.

**Figura 3. Espesor de aislamiento térmico (m) en cada zona climática**



Para obtener la cantidad de material de aislamiento se considera como unidad funcional el peso (kg) necesario para proporcionar la R requerida en cada uno de los escenarios, para 50 años de vida útil del edificio. Así, según las R, se obtiene el espesor de material en función de su  $\lambda$ . Seguidamente, los cálculos de demanda energética y de consumo de energía primaria, obtenidos de las simulaciones, se traducen para una vida útil del edificio de 50 años, resultados que se presentan en la Tabla 7.

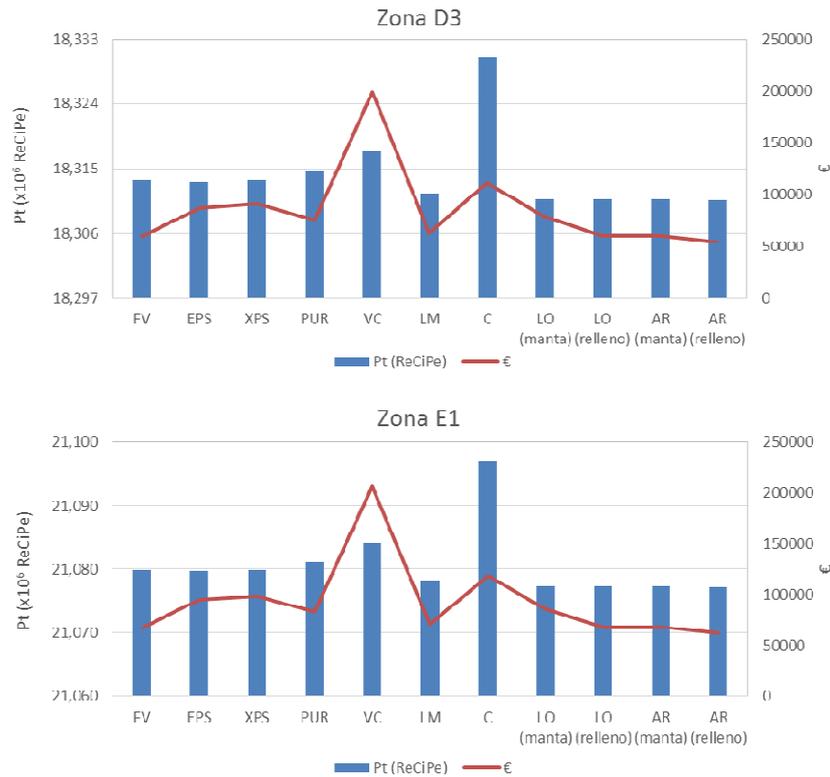
**Tabla 7. Demanda energética de calefacción y consumo de energía primaria durante la vida útil del edificio (50 años) ( $kWh/m^2 \cdot año$ )**

Escenario	Demanda energética		Consumo de energía primaria	
	Sin AT	Con AT (exigencia CTE)	Sin AT	Con AT
A3	23.93	15.00	50.13	38.49
B3	50.13	15.00	92.58	43.85
C3	85.47	24.86	130.46	52.59
D3	121.67	36.72	177.12	68.04
E1	163.29	54.58	217.96	78.32

**Etapa III.** Para la obtención de los indicadores ambientales y económicos se ha considerado como unidad funcional el uso del edificio descrito en el apartado 3 durante 50 años, incluyendo en el estudio las etapas de adquisición de los materiales del edificio y uso del mismo durante 50 años (Barrau, Ibañez & Badia, 2014; Sierra-Pérez, Boschmonart-Rives & Gabarrell, 2016). El inventario ambiental se ha modelado tomando como referencia la base de datos Ecoinvent (Ecoinvent Database 3.1, 2014), y se ha utilizado el método ReCiPe como método de evaluación del impacto (Goedkoop *et al.*, 2008), todo ello, modelado en SimaPro 8.3.2 (Prè Consultants, 2016). Los indicadores económicos se han obtenido de la combinación de precios de fabricantes y del cuadro de precios del Instituto Valenciano de la Edificación (2016) para la etapa de adquisición de materias primas, y del precio promedio en España del kWh eléctrico para la etapa de uso. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 4.

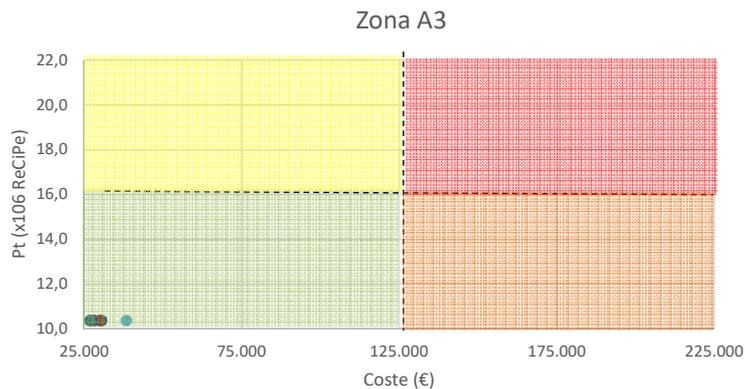
**Figura 4. Impacto ambiental (ReCiPe, Pt) y Coste (€) por zona climática, para cada material de aislamiento térmico**

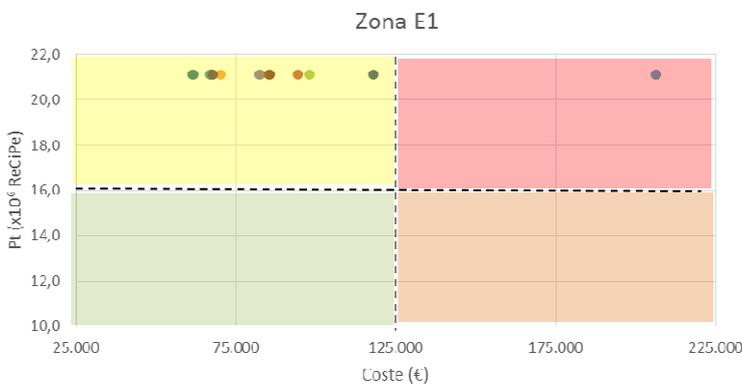
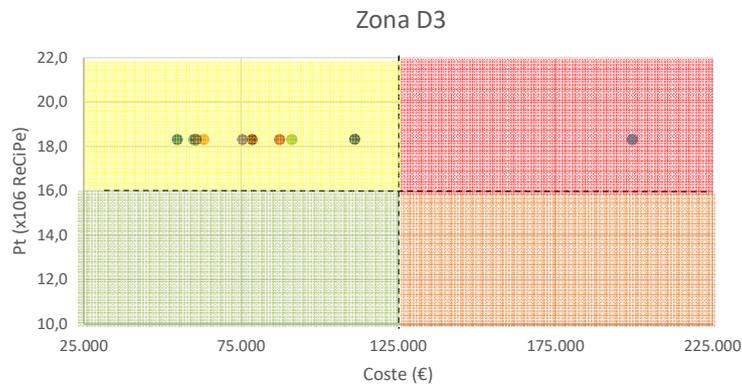
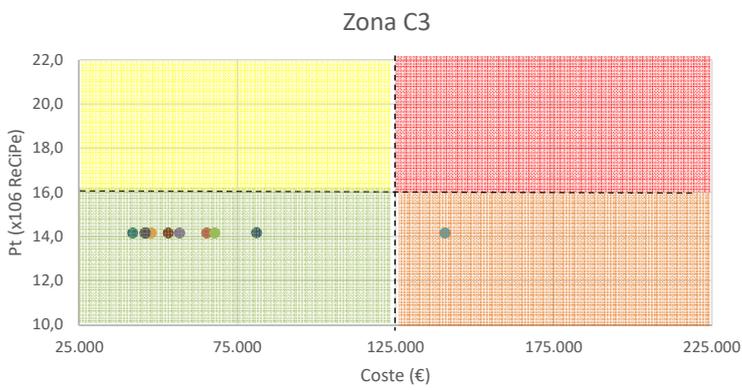
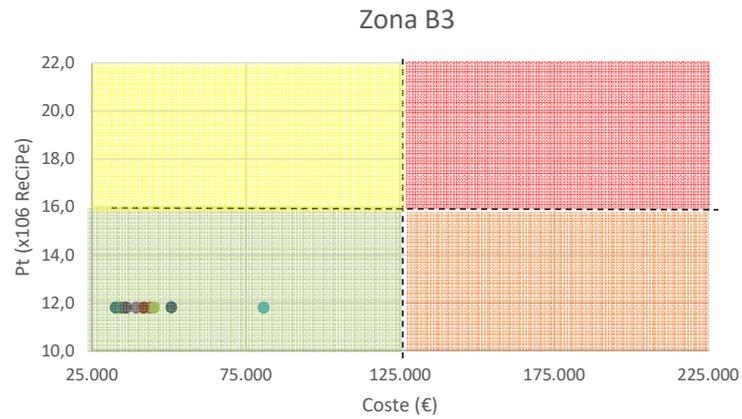




**Etapla IV.** A partir de los resultados de la etapa anterior, es posible representar los indicadores ambiental y económico obtenidos para cada material de aislamiento en cada zona climática. Ello se realiza mediante un diagrama de ecoeficiencia (Ibáñez-Forés, Bovea & Azapagic, 2013). Con el fin de poder comparar los resultados, se han representado cada diagrama de ecoeficiencia correspondiente a cada zona climática en una misma escala.

**Figura 5. Ecoeficiencia: impacto ambiental (Pt, ReCiPe) vs. impacto económico (€)**





- FV
- EPS
- XPS
- PUR
- VC
- LM
- C
- LO (en manta)
- LO (en relleno)
- AR (en manta)
- AR (en relleno)

## 5. Discusión y conclusiones

Como se desprende de la Tabla 6, la resistencia térmica requerida para los sistemas constructivos de cubierta, fachada y suelo del edificio aumenta notablemente a medida que la zona climática es más severa en términos de severidad climática de invierno. Ello se traduce en la necesidad de un aumento del espesor de aislamiento térmico para cubrir la demanda energética de calefacción del edificio exigida por la normativa. Dicho espesor depende del tipo de material utilizado en cada caso y de su conductividad térmica (Figura 3).

Como se observa en la Figura 4, el impacto ambiental y el coste económico derivado del uso de aislamiento térmico se incrementa al variar el escenario de zona climática (A→E). Los materiales que conllevan un mayor impacto ambiental son el vidrio celular (VC) y el corcho natural (C), además de implicar también un mayor coste económico asociado. Los materiales naturales de lana de oveja (LO) y algodón reciclado (AR), tanto en formato manta como en relleno, junto con la lana mineral (LM) son los que garantizan un menor impacto ambiental, así como un coste más competitivo.

Por otro lado, se aprecia que aquellos materiales que se presentan en el mercado en formato de relleno, permiten una mejor optimización del espesor de aislamiento térmico, ya que facilitan el ajuste del espesor al mínimo requerido para cumplir con los estándares normativos. Como consecuencia de ello, se extrae que las empresas fabricantes deben apostar por los materiales en formato de relleno o, como alternativa, ofrecer un mayor rango de espesores comerciales que permitan ajustar la ejecución del edificio a las condiciones normativas del proyecto.

Los resultados obtenidos en la Figura 5 corroboran la ecoeficiencia de incorporar aislamiento térmico en la envolvente del edificio, pues en las zonas climáticas A3, B3 y C3, todos los materiales de aislamiento se encuentran englobados en el Área I de ecoeficiencia (bajo impacto ambiental – bajo coste económico). Sin embargo, en las zonas D3 y E1, las más severas en condiciones de invierno, la mayoría de los materiales se desplazan al Área II (alto impacto ambiental – bajo coste económico), debido a la necesidad de aumentar considerablemente el espesor de aislamiento térmico. El impacto ambiental, además, se acentúa cuando el edificio se encuentra ubicado en la zona climática E1.

Por otro lado, se puede afirmar que la VC y el C resultan los materiales menos ecoeficientes. En las zonas climáticas A3 y B3, a pesar de encontrarse en el Área I de ecoeficiencia, se presentan como los materiales que presentan mayor impacto ambiental con respecto al resto, en la zona C3 el VC se encuentra en el Área III y en las zonas D3 y E1 en el Área IV (menos ecoeficiente).

Como conclusión, destacar que este estudio presenta una metodología general de evaluación de la ecoeficiencia (impacto ambiental vs. económico) de diferentes materiales aislantes aplicables en la edificación, para cumplir con las exigencias del CTE para cada una de las zonas climáticas. De su aplicación a la comparativa de 11 materiales, tanto convencionales como emergentes, puede concluirse que la industria de la construcción debe promover el uso de materiales aislantes naturales como lana de oveja y algodón reciclado, junto con la lana mineral tradicionalmente utilizada, ya que presentan elevada ecoeficiencia. Las conclusiones obtenidas del estudio pueden asistir a los diferentes agentes implicados en el sector de la edificación, en el objetivo de diseñar y construir edificaciones de consumo de energía casi nulo.

## Referencias

Barrau, J., Ibañez, M., Badia, F. (2014). Impact of the optimization criteria on the determination of the insulation thickness. *Energy and Buildings*, 76, 459-469. doi: 10.1016/j.enbuild.2014.03.017.

- Bovea, M.D., Braulio-Gonzalo, M. (2017). Comparación ambiental-económica de material de aislamiento térmico para la envolvente del edificio a fin de reducir la demanda energética. En *Proceedings of 21st International Congress on Project Management and Engineering* (pp. 531-543). España: Cádiz.
- Braulio-Gonzalo, M., Bovea, M.D. (2017). Environmental and cost performance of building's envelope insulation materials to reduce energy demand: Thickness optimization. *Energy & Buildings*, 150, 527-545. doi: 10.1016/j.enbuild.2017.06.005.
- CTE (2013). Orden FOM/1635/2013, de 10 de septiembre, por la que se actualiza el Documento Básico DB-HE Ahorro de Energía del Código Técnico de la Edificación, aprobado por Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo. España.
- Davis Langdon Management Consulting (2007) Life Cycle Costing (LCC) As a Contribution to Sustainable Construction: a Common Methodology. Guidance on the Use of the LCC Methodology and its Application in Public Procurement
- Ecoinvent Database 3.1 (2014). Disponible en: <http://www.ecoinvent.org/> (Accedido: 10 de enero de 2018).
- European Union. Directive 2010/31/UE of the European Parliament and of the Council on the Energy Performance of Buildings. Official Journal of the European Union, of 19 may 2010, núm. 153/13.
- Goedkoop, M. J., Heijungs, R., Huijbregts, M., Schryver, A. De, Struijs, J., Zelm, R. Van (2008). ReCiPe. A life cycle impact assessment method, which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level; First edition Report I: Characterisation.
- Ibáñez-Forés, V., Bovea, M.D. & Azapagic, A. (2013). Assessing the sustainability of Best Available Techniques (BAT): Methodology and application in the ceramic tiles industry. *Journal of Cleaner Production*, 51, 162-176. doi: 10.1016/j.jclepro.2013.01.020.
- Instituto Valenciano de la Edificación (2016). Base de Datos de Construcción de la Comunitat Valenciana. Valencia. Disponible en: <http://www.five.es/basedatos/Visualizador/Base16/index.htm>.
- ISO 14040 (2006) Environmental management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework.
- ISO 14045 (2012) Environmental Management - Eco-Efficiency Assessment of Product Systems - Principles, Requirements and Guidelines.
- Prè Consultants (2016). SimaPro Database 8.3.2.
- Schiavoni, S., Alessandro, F.D., Bianchi, F., Asdrubali, F. (2016). Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 988-1011. doi: 10.1016/j.rser.2016.05.045.
- Sierra-Pérez, J., Boschmonart-Rives, J., 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.
- Universidad de Sevilla (2013). HULC Herramienta Unificada LIDER-CALENER. *Ministerio de Fomento de España*. Madrid

## Agradecimientos

Las autoras agradecen al Pla de Promoció de la Investigació de la Universitat Jaume I (POSDOCA/2017/17), la financiación recibida para la realización de este estudio.