

Evaluación económica de la resistencia térmica de la vivienda de interés social en las ciudades tropicales de México

Economic evaluation of thermal resistance in low cost housing in Mexican tropical cities

Christopher Lionel Heard*, Sazcha Marcelo Olivera Villarroel**

RESUMEN

Este artículo analiza el efecto de las prácticas de aislamiento térmico en las viviendas de interés social en México, las cuales implican inversiones menores en infraestructura y ahorros de energía para sus habitantes y para la sociedad en su conjunto, al representar menores costos en el uso de energía eléctrica destinada a sistemas de ventilación y aire acondicionado. La problemática tratada aquí es de suma importancia para las ciudades de las regiones secas y húmedas del país, donde los asentamientos humanos van en aumento. El estudio muestra la versatilidad de la metodología de costos/beneficio en la evaluación de opciones de inversión ante diferentes entornos climáticos y ambientales.

ABSTRACT

The article discusses the effect of the practice of thermal isolation in social housing in Mexico, which involve investment in infrastructure and energy savings for residents and economic, to represent lower costs in the use of electricity for ventilation systems and air conditioning. The problem treated is of vital importance to the cities in the dry and wet region of the country in which human settlements are rising. The study shows the versatility of the Cost/Benefit methodology in evaluating investment options to different climatic and environmental conditions.

INTRODUCCIÓN

Las características geográficas y climáticas de México, como su latitud, diversidad de relieves, circulación atmosférica, posición entre dos grandes océanos, al igual que su ubicación sobre el Trópico de Cáncer, influyen en la predominancia de climas tropicales en las principales ciudades de México. Grandes extensiones del país se encuentran sometidas a las condiciones de un clima tipo tropical, es decir, a la alternancia lluviosa y seca con una marcada estacionalidad en general y temperaturas bastante elevadas. Aun así este esquema climático se transforma notablemente a causa de la altitud sobre el nivel del mar de las regiones montañosas, contemplándose climas más benignos con regiones templadas y frías muy próximas a la región centro sur del país (Mosiño, 1969).

Estos factores geográficos inciden en la existencia de grandes centros urbanos en zonas climatológicas de altas temperaturas y en el caso de las costas, adicionalmente de alta humedad. En dichas regiones no es posible satisfacer las condiciones óptimas de confort térmico dentro la vivienda sin el uso de equipo de aire acondicionado. La forma más económica de mejorar el comportamiento térmico en las viviendas y generar confort para sus habitantes es aumentando la resistencia térmica o aislamiento térmico de los muros y techos, reduciendo el ingreso de calor y, por tanto, la capacidad instalada de los equipos de aire acondicionado y con ellas el uso de energía eléctrica.

Recibido: 3 de marzo de 2013
Aceptado: 8 de agosto de 2013

Palabras clave:
Costo/beneficio; vivienda social; aislamiento térmico; clima cálido.

Keywords:
Cost/benefit; low cost; thermal resistance; optimization.

* Departamento de Teorías y Procesos del Diseño, Universidad Autónoma Metropolitana-Unidad Cuajimalpa. Av. Constituyentes 1054, Col. Lomas Altas, Delegación Miguel Hidalgo, México, D.F., C.P. 11950. Tel.: (55) 91776650. Correo electrónico: cheard@correo.cua.uam.mx

** Departamento de Teorías y Procesos del Diseño, Universidad Autónoma Metropolitana-Unidad Cuajimalpa. Av. Constituyentes 1054, Col. Lomas Altas, C.P. 11950, Delegación Miguel Hidalgo, México, D. F., C.P. 11950. Tel.: (55) 91776650. Correo electrónico: satzcha@msn.com

Desarrollar estas nuevas prácticas de aislamiento térmico en las viviendas de estas regiones implica inversiones mayores para sus habitantes y para la económica en general. Debido a ello, familias, empresas constructoras, programas de viviendas federales y estatales deben justificar o percibir que tales incrementos en sus inversiones de infraestructura representan ahorros en el consumo de energía eléctrica a futuro (Heard & Ramos, 1998).

La experiencia en otros países indica que aún en hogares de bajos ingresos existe un uso creciente de unidades de aire acondicionado, ello a pesar de los costos de la energía eléctrica (Adnot *et al.*, 1999; Ang, Goh & Liu, 1992; International Energy Agency [IEA], 2002), por lo que generar ahorros en el uso del aire acondicionado repercutirían directamente en la economía de las familias de ciudades tropicales, en especial en aquéllas que habitan en viviendas de interés social. Ésta es la principal hipótesis del presente estudio.

Para los programas de vivienda federal y estatal esta visión representa un cambio de paradigma de viviendas sociales tipo, ya que implica repensar en diseños particulares que se adecuen a las características propias del clima, a la radiación solar y al comportamiento climático de cada región. Estudios como el desarrollado por Rodríguez (2005) y Heard & García (2011) muestran que para las viviendas tradicionales de cada región de México se han creado soluciones particulares a las peculiaridades climáticas de cada región, las cuales tienen cambios muy bruscos en su comportamiento con pequeños desplazamientos de latitud y altura sobre el nivel del mar.

Se propone una metodología basada en el análisis de costo/beneficio para determinar diferentes opciones de mejora en el aislamiento térmico de muros y techos en edificaciones de interés social y comparándolas con la práctica actual de no usar aislamiento térmico en este tipo de construcciones. Para dicho propósito es necesario establecer un punto de comparación que no solamente tome en cuenta los costos de construcción sino el entorno financiero, la vida útil de la vivienda y los parámetros técnicos adecuados para establecer dicho costo/beneficio.

En el estudio se considera, como punto de análisis, el tipo de vivienda más comúnmente producida por el sector de interés social masivo. Para ello, se utilizarán como estudios de caso análisis previos a unidades habitacionales en ciudades del norte del país y extrapolando información a ciudades del sur de México.

Diseños representativos de edificios típicos para el caso de casas colindantes con muros compartidos

En el censo de vivienda del año 2010, las estadísticas muestran que alrededor del 4% de la población que forma la República mexicana vive en departamentos

en edificios. Los registros no contienen datos sobre casas con muros compartidos, sin embargo la mayoría de los desarrollos de casas de interés social que se construyeron en México en las últimas décadas son de este tipo de construcción (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2010).

Para llevar a cabo el estudio se diseñaron y modelaron en forma digital casas con muros compartidos con el objeto de determinar las transferencias de calor entre estas viviendas y el comportamiento térmico de las casas que no comparten muros. Se propuso una casa de dos pisos con 52 m² de construcción, considerando que es representativa de las construcciones de interés social, con dos recámaras, un espacio de sala-comedor, una cocineta y un baño (figura 1).

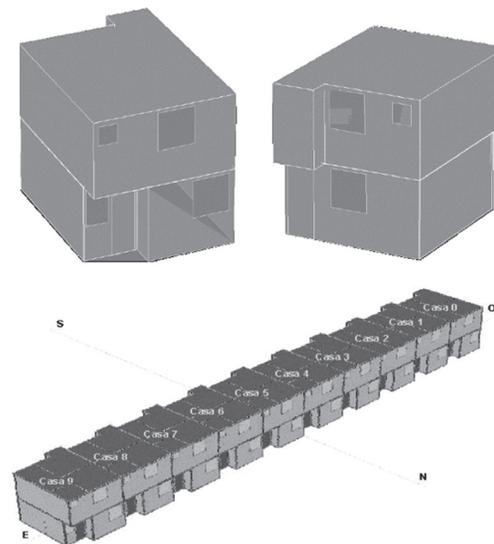


Figura 1. Propuesta de casas colindantes con muros compartidos.
Fuente: Elaboración propia.

Se llevó a cabo el modelado de un conjunto de diez casas en forma horizontal que comparten muros (figura 1), con las mismas dimensiones y acomodo, salvo las de los extremos del conjunto, ya que éstas tienen un muro exterior y un muro compartido, a diferencia de las casas internas que comparten ambos muros con las construcciones aledañas.

En el diseño propuesto se consideraron los materiales comúnmente utilizados en la construcción de desarrollos de interés social en México. Es importante comentar que estudios realizados en Mexicali indican que los ocupantes de este tipo de vivienda con frecuencia utilizan aire acondicionado (Romero-Moreno, 1994). En las tablas 5, 8, 9 y 10 (dispuestas en el anexo al final del artículo) se muestran los tipos de construcción para los diferentes

elementos de las casas; dichos elementos de construcción representan materiales que se utilizan actualmente y los acabados comunes de casas económicas.

De acuerdo con los resultados del censo del año 2010, para casas independientes la ocupación media es de cuatro personas, con cuatro cuartos (sala, comedor, cocina y recámara), sin incluir el baño (INEGI, 2010). Para las cargas térmicas internas de uso de equipos eléctricos, estufas y los ocupantes se utilizaron los valores de las tablas 6 y 7 (ver anexo), los cuales resultaron en un consumo de energía eléctrica básico entre 90 kWh y 110 kWh mensuales (INEGI, 2010).

Se realizó el modelo de vivienda para nueve ciudades: cuatro con datos meteorológicos históricos de sus respectivos aeropuertos (Mexicali, Monterrey, México, D.F. y Mérida) y cinco adicionales para los cuales se consiguieron archivos de datos meteorológicos históricos que se pueden emplear en el programa DOE2 (DOE2.com, 2012). Este programa permite analizar el consumo de energía en edificaciones bajo diferentes condiciones climáticas. De la muestra, cuatro son datos de tres ciudades, un municipio fronterizo en Estados Unidos (Ciudad Juárez, Nuevo Laredo, Matamoros y Palestina, Coahuila) y la ciudad de Villahermosa.

El cálculo de costo/beneficio (CB)

El análisis de costo/beneficio (CB), utilizado en la evaluación social y económica de un proyecto de inversión y desarrollo, busca indicadores que permitan tomar la decisión de realizar o no un proyecto en función de la existencia de otras opciones de inversión, sin dejar de lado la opción de no realizar la inversión si se considera que la misma no tiene beneficios mayores que los costos que se incurre en realizarla (Hufschmidt, 2000). La evaluación económica y social del método CB consiste en determinar si los beneficios, al incluir un proyecto cualquiera, son suficientes para cubrir los costos de inversión necesarios para su realización, en donde todos los valores serán determinados a una misma referencia en valor presente, calculados a partir de una tasa de descuento.

Este método es un clásico de la valoración de inversiones en activos fijos, proporcionando una valoración financiera en el momento actual de los flujos de caja netos proporcionados por la inversión. Este método parte como una prueba para decidir qué inversiones se deben realizar en escenarios de escasez de fondo y múltiples alternativas. CB es una lógica o razonamiento basado en el principio de obtener los mayores y mejores resultados al menor esfuerzo invertido, tanto por eficiencia técnica como por motivación humana. Se supone que todos los hechos y actos pue-

den evaluarse bajo esta lógica, y forma la base de la evaluación de proyecto e inversión.

La metodología se puede resumir de la siguiente manera:

- Operatoria
 - Mediante una tasa de descuento actualiza todos y cada uno de los flujos de caja que produce la inversión (costos y beneficios).
 - Tiene en cuenta la cronología de los distintos flujos de caja.
- Ventajas
 - Tiene en cuenta el valor del dinero en cada momento. Es un modelo sencillo de llevar a la práctica.
 - Ofrece un valor actual fácilmente comprensible y comparable con otras opciones financieras o de inversión.
 - Es muy flexible permitiendo utilizar, en función de la existencia de información, cualquier variable que pueda afectar a la inversión, inflación, incertidumbre, fiscalización, etcétera.
- Desventajas
 - Hay que tener especial cuidado en la determinación de la tasa de descuento y el análisis temporal de los proyectos.
 - El análisis clásico de CB no considera efectos más allá del ámbito del proyecto, como la generación de pasivos ambientales, emisiones de contaminantes, uso de energías alternativas, etcétera. Hoy en día, estos aspectos deben ser considerados al momento de desarrollar el método.

Fórmula de cálculo beneficios y costos:

$$VAN = -A + \frac{Q_1}{(1 + K_1)} + \frac{Q_2}{(1 + K_1) \cdot (1 + K_2)} + \dots + \frac{Q_n}{(1 + K_1) \dots (1 + K_n)}$$

Donde:

- VAN = Valor actual neto de los beneficios.
- A = Valor de los beneficios iniciales.
- Qi = Valor neto de los distintos beneficios por cada periodo de análisis i. Se trata del valor neto, cuando en un mismo periodo se den flujos positivos y negativos, ésta será la diferencia entre ambos flujos.
- Ki = Tasa de retorno del periodo i

Para la realización de los estudios de CB de diferentes niveles de aislamiento térmico para las diferentes partes de la República mexicana se requiere de parámetros básicos de inversión y funcionamiento. Estos

datos comprenden costos de materiales, equipos, mano de obra, costos financieros, costos de energía eléctrica y tasa de descuento y/o tasa de retorno de la inversión. El caso base de análisis considera una vivienda social tipo como la vista en la figura 1.

El costo capital de los casos con aislamiento térmico mayores al caso base consiste en el costo del material adicional de aislantes, sus accesorios de fijación y protección, la mano de obra, menos la disminución del costo de la unidad de aire acondicionado (por requerir unidad de menor capacidad). Los costos de energía eléctrica se basan en las tarifas de los últimos doce meses para contratos de servicio doméstico. Junto con los resultados del modelado térmico de las viviendas propuestas se pueden estimar los consumos de energía eléctrica con diferentes niveles de aislamiento térmico en paredes y techos.

La disminución del consumo de energía eléctrica con respecto a la línea base, para los casos de mayor aislamiento térmico, resulta en un ingreso virtual (los ahorros de energía que son fundamento de la evaluación realizada en el estudio). Los parámetros financieros se basan en las tasas de interés más bajas del mercado hipotecario del año de referencia, y las tasas de descuento y/o retorno se basan en criterios para la inversión pública establecidos por la Secretaría de Hacienda. El periodo a considerar para el cálculo de CB se basa en los criterios para inversiones públicas del Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos.

▫ Costos de materiales de construcción y mano de obra

Existe información del costo de la incorporación de aislantes térmicos en la construcción utilizados en el desarrollo de estudios de CB de proyectos de normas de comportamiento térmico de edificaciones, como la propuesta por Halverson, Stucky, Friedrich, Godoy-Kain, Keller & Somasundaram (1994); Heard & Ramos (1997); Heard & Ramos (1998); Huerta (2002) y Rivas (1994). Para llevar estos datos a valores actuales se utilizaron los índices de inflación publicados por el Banco de México. En anexos se muestran los costos específicos utilizados en dichos estudios (tablas 5 y 6).

▫ Costos de equipos de aire acondicionado

Los sistemas de aire acondicionado utilizados en las viviendas de las regiones analizadas son de comercialización masiva. En vivienda de interés social las unidades de aire acondicionado no forman parte del equipamiento de la misma, los ocupantes los adquieren posteriormente. No obstante, en lugares de climas calientes, el aire acondicionado es uno de las adquisiciones prioritarias.

▫ Costos de energía eléctrica

Se utilizarán las tarifas de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) de octubre 2002 a septiembre 2003 para servicio doméstico: tarifas 1 a 1F y DAC.

▫ Tasa de interés

La tasa de interés hipotecario para vivienda de interés social más representativo son las del Fondo de Vivienda de Infonavit. Se propone utilizar la tasa más alta de éstas, que corresponde a personas con ingresos medio alto (entre cinco y nueve salarios mínimos): 9%.

▫ Tasa de inflación

Para el cálculo de valor presente es necesario tomar en cuenta la inflación. En este caso, la tasa de inflación sería la del costo de la vivienda de interés social. La inflación de costos de vivienda de interés social ha fluctuado ligeramente arriba de 10% hasta un nivel cercano al cero por ciento. Se propuso utilizar el promedio de 4.5% correspondiente a la inflación del mes con mayor consumo de energía en aire acondicionado, en este caso julio. Esta consideración se realiza ya que la inversión en aislante térmico tendrá mayor impacto sobre dicho consumo en el mes de mayor consumo de referencia.

▫ Tasa de descuento y de retorno

Dado que el anteproyecto de norma pretende disminuir las inversiones necesarias en capacidad de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica, se supone que las tasas de descuento y de retorno aplicables a inversiones de dicha naturaleza son las que también son aplicables a inversiones de racionalización de uso de energía en aire acondicionado en vivienda. En el documento *Prospectiva del sector eléctrico 2002-2011* de la Secretaría de Energía (Sener) se utilizó una tasa de descuento de 10% para proyectos de generación geotérmica y eólica (Secretaría de Energía [Sener], 2002).

Según Fonseca, López & Ornelas (2003):

Para comparar el costo de una planta de generación construida por la Comisión Federal de Electricidad —CFE— con una de un productor independiente se utiliza una tasa de descuento para el Organismo de 7%. Sin embargo, en el cálculo de la tarifa “correcta” de respaldo, para calcular el costo de la misma planta, se utiliza una tasa del 10%. Se utilizan distintos plazos de recuperación de la inversión para una misma planta de ciclo combinado: Si la inversión la hace CFE, se utilizan 25 años para comparar el costo con

el de un productor independiente y 10 años para calcular la tarifa “correcta” de respaldo. Si la inversión la hace un privado, se utilizan 25 años en la comparación y 6 años en el análisis de la tarifa de respaldo.

Con base en lo anterior, se concluye que la tasa de descuento más apropiada para los estudios de CB del aislamiento térmico es de 10%, siendo la tasa impuesta por la Secretaría de Hacienda y Crédito Público de México para la temporada 2002.

▫ Período a considerar para la vida útil de las inversiones en aislamiento térmico

El periodo de estudio de CB para las adecuaciones térmicas a las viviendas debería ser igual a su vida útil. No obstante, los métodos de construcción actuales tienen menos tiempo en uso que su vida útil y, por lo tanto, no es posible saber de manera segura tal vida útil. Se puede esperar que dado que los aislantes térmicos se encuentran protegidos dentro de los sistemas constructivos, su vida útil será del mismo orden que la de la construcción en sí. Actualmente, los préstamos hipotecarios varían entre quince y treinta años, lo cual es evidencia que las instituciones financieras esperan que la vida útil de una vivienda exceda treinta años. Se propuso utilizar un periodo de veinticinco años para los estudios de CB.

▫ Valor presente

Para el cálculo del valor presente se estimaron los ahorros de energía eléctrica con la tasa de inflación de la energía eléctrica propuesta anteriormente, y se utilizó la tasa de inflación para la vivienda de interés social (4.5%) en la siguiente fórmula para el factor de descuento (Perry & Green, 1997):

$$\text{Factor de descuento} = \frac{1}{((1 + \text{Tasa de descuento})^{\text{Año}} \cdot (1 + \text{Tasa de inflación})^{\text{Año}})}$$

Aplicando el análisis costo/beneficio de niveles de aislamiento térmico para casas habitación

Para llevar a cabo el análisis de CB de los niveles de aislamiento térmico para casas solas, se decidió modelar la casa utilizando el programa DOE2, el cual presenta de manera detallada el comportamiento del sistema de aire acondicionado y los otros consumos eléctricos dentro de la vivienda, para obtener un valor de consumo y demanda máxima de energía muy cercanos a los valores reales (DOE2.com, 2012).

Para la cuantificación del CB se utilizó la ecuación del valor presente de los beneficios; para esto se consideraron veinticinco años del estudio económico, divididos entre los costos adicionales estimados para la construcción al incorporar aislante térmico en los muros y techos, menos la reducción estimada del costo del sistema de aire acondicionado. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 1 y en el anexo (tablas de la 11 a la 18); de estas tablas se puede observar que los valores mayores a uno indican que los beneficios estimados a valor presente exceden los costos estimados.

Tabla 1.
Resultados del estudio CB para Mexicali.

Consumo anual de energía eléctrica (kWh)	Costo anual de energía eléctrica (\$M.N.)	Tamaño de la unidad de aire acondicionado (T.R.)	Aislamiento térmico promedio de la envolvente de la vivienda (m ² KW ⁻¹)	Inflación anual del costo de la factura eléctrica: julio 2002 a julio 2003* (%)	Valor presente del aislamiento térmico (\$M.N.)	Costo/beneficio en valor presente
9811	\$6 627.70	4.33	0.43	-19.49%	\$0	0.00
7870	\$4 567.99	3.21	0.74	-11.19%	\$-18 864	0.32
7110	\$3 691.66	2.78	1.04	-3.81%	\$-10 630	0.63
6422	\$3 073.30	2.42	1.62	9.24%	\$21 432	1.69
6123	\$2 797.09	2.27	2.17	3.03%	\$433	1.01
5961	\$2 718.56	2.2	2.68	14.76%	\$61 665	2.63
5767	\$2 624.53	2.1	3.64	34.80%	\$1 389 829	31.86
5630	\$2 558.12	2.03	4.91	55.72%	\$30 647 092	547.79

*Debido a cambios de la estructura de la tarifa 1F entre julio de 2002 a julio de 2003 (se agregó una segunda banda de consumo intermedio) la comparación de facturación entre años da resultados anómalos.
Fuente: Elaboración propia.

▫ Relación entre temperaturas medias y niveles de aislamiento térmico

La figura 2 y la tabla 2 muestran que existe poca diferencia de consumo de energía entre las casas intermedias que van de la uno a la ocho; las casas uno y ocho presenta un consumo de energía ligeramente mayor al de las casas dos a la siete. Sin embargo, en las casas de los extremos que corresponden a la cero y nueve se observa que tienen un consumo mayor debido a que tienen una proporción mayor de superficie expuesta al exterior. Por lo anterior, se puede considerar el mismo comportamiento en las casas intermedias, que van de la uno a la ocho.

Para establecer el caso de máxima transferencia de calor entre casas, se escogió los casos de orientación solar máxima, consumo de energía eléctrica, y se llevaron a cabo simulaciones con aire acondicionado solamente en la casa cuatro de la figura 1, por considerarla la casa típica para efectos

de comparación. Se comparó el consumo de energía eléctrica en el caso de todas las casas con aire acondicionado con el caso de una sola casa con aire acondicionado, y se relacionó con la temperatura media de los seis meses consecutivos de mayor calor. La tabla 2 muestra una alta correlación entre los diferenciales de consumo de energía eléctrica y la humedad relativa en las ciudades utilizadas en el estudio.

Los muros compartidos de la casa cuatro (figura 1) son casi 40% de la zona envolvente completa de la casa. Se comparó la carga térmica de enfriamiento para el caso en el que todas las casas tuvieran aire acondicionado contra el caso en el que solamente la

casa cuatro posee aire acondicionado. La diferencia encontrada se debe a que ingresa calor desde las casas colindantes sin aire acondicionado. No obstante, existe un incremento apreciable de calor que ingresa a la casa acondicionada; el incremento en el consumo de electricidad no es proporcional, esto se debe a que existe un consumo básico independiente del aire acondicionado.

Tabla 2.

Diferencias de consumo de energía eléctrica estimada causada por variaciones en orientación.

Ciudad	Diferencia máxima con respecto al consumo promedio: casas 1 al 8	Diferencia mínima con respecto al consumo promedio: casas 1 al 8	Diferencia máxima con respecto al consumo promedio: casas 0 y 9	Diferencia mínima con respecto al consumo promedio: casas 1 al 8
Mexicali	12.5%	-11.2%	11.4%	-10.6%
Monterrey	9.3%	-8.2%	8.5%	-7.7%
México, D.F.	8.8%	-8.0%	7.0%	-7.2%
Mérida	9.0%	-8.1%	8.6%	-7.4%
Villahermosa	10.0%	-8.6%	10.1%	-8.2%
Cd. Juárez	12.0%	-10.9%	10.6%	-10.1%
Palestina	10.5%	-9.3%	9.5%	-8.5%
Nuevo Laredo	10.2%	-9.0%	9.3%	-8.4%
Matamoros	10.3%	-9.4%	9.4%	-8.8%

Fuente: Elaboración propia.

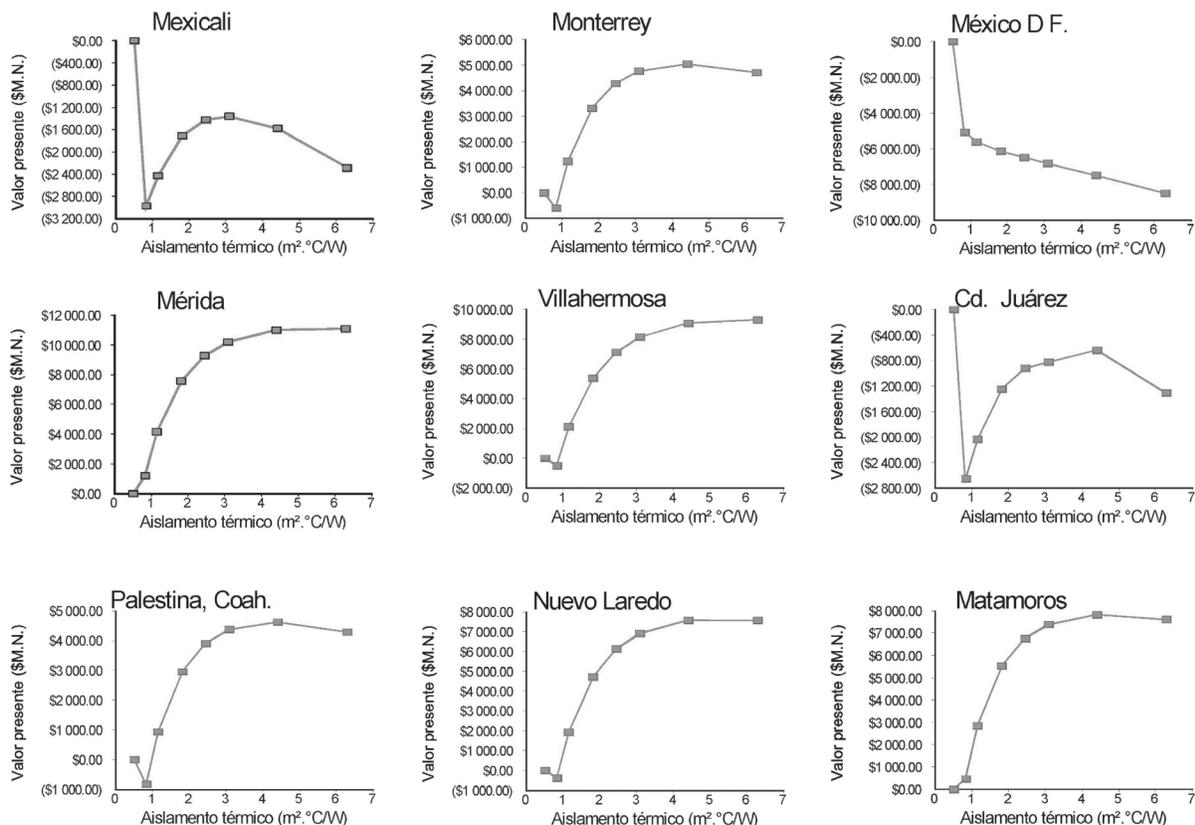


Figura 2. Valor presente de aislamiento térmico en muros compartidos de una casa con aire acondicionado que colinda con casas sin aire acondicionado. Fuente: Elaboración propia.

Del análisis de los casos de la tabla 3, se puede apreciar que existen ciudades donde el uso de aislamiento térmico en muros compartidos tiene un valor presente negativo (tablas 3 y 4). En el caso de una casa con un vecino usando aire acondicionado se observa que la rentabilidad de aislar los muros compartidos es poca o nula en la mayoría de las ciudades

estudiadas. Durante la vida útil de una vivienda es muy probable que eventualmente en la mayoría de las casas se instale una unidad de aire acondicionado.

Cuando las dos casas que comparten un muro utilizan aire acondicionado los flujos de calor entre ellas es despreciable y el uso de aislamiento térmico no sería económicamente justificado.

Tabla 3.

CB del aislamiento térmico en muros compartidos de una casa con aire acondicionado que colinda con casas sin aire acondicionado.

Resistencia térmica (m ² K/W)	Mexicali	Monterrey	México, D.F.	Mérida	Villahermosa	Cd. Juárez	Palestina, Coahuila	Nuevo Laredo	Matamoros
0.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.83	0.11	0.82	-0.55	1.35	0.86	0.20	0.75	0.89	1.14
1.15	0.32	1.35	-0.62	2.17	1.59	0.42	1.26	1.54	1.80
1.82	0.57	1.84	-0.59	2.90	2.35	0.68	1.75	2.19	2.39
2.45	0.68	1.99	-0.52	3.11	2.62	0.79	1.90	2.40	2.55
3.09	0.72	2.01	-0.47	3.13	2.70	0.83	1.92	2.46	2.55
4.40	0.72	1.92	-0.38	2.98	2.64	0.88	1.84	2.37	2.41
6.29	0.66	1.71	-0.29	2.65	2.39	0.80	1.64	2.13	2.14

Fuente: Elaboración propia, con base en datos climáticos de Comisión Nacional del Agua (CNA).

Tabla 4.

CB de aislamiento térmico en muros compartidos de una casa con aire acondicionado que colinda con una casa sin aire acondicionado y una casa con aire acondicionado.

Resistencia térmica (m ² K/W)	Mexicali	Monterrey	México, D.F.	Mérida	Villahermosa	Cd. Juárez	Palestina, Coahuila	Nuevo Laredo	Matamoros
0.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.83	0.16	0.46	0.14	0.97	0.65	0.06	0.43	0.55	0.68
1.15	0.30	0.74	0.05	1.51	1.09	0.17	0.71	0.93	1.05
1.82	0.44	1.00	0.01	1.97	1.51	0.40	0.96	1.28	1.34
2.45	0.48	1.07	0.00	2.09	1.64	0.45	1.04	1.38	1.41
3.09	0.50	1.08	-0.01	2.09	1.67	0.47	1.05	1.40	1.41
4.40	0.48	1.03	-0.01	1.98	1.60	0.46	1.00	1.34	1.32
6.29	0.43	0.91	0.00	1.75	1.43	0.42	0.89	1.20	1.17

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

El uso del análisis de CB como opción de evaluación entre diferentes opciones de mejora en el aislamiento térmico de los muros y techos nos brinda una opción clara para determinar la conveniencia del uso de este

tipo de tecnologías, dadas las condiciones climáticas y económicas de cada región en particular. En el análisis se observa que, en regiones de calor extremo y alta incidencia de humedad, las mejoras en el aislamiento de muros y techos muestran comportamientos beneficiosos para los habitantes de casas de interés social.

No solamente brindan un mejor confort térmico para sus usuarios, sino representan menores costos en el uso de energía eléctrica destinada a sistemas de ventilación y aire acondicionado.

Para ello se estableció un punto de comparación que toma en cuenta los costos de construcción, el entorno financiero, la vida útil de la vivienda y los parámetros técnicos adecuados para establecer dichos costos y beneficios. Para nuestra investigación utilizamos como punto de análisis el tipo de vivienda más comúnmente producido por el sector de interés social masivo, usando, además, información generada para diferentes tipos de construcción realizados en estudios anteriores.

El análisis permite generar un índice medible que compara alternativas de construcción que se pueden extrapolar a otras áreas del diseño urbano y habitacional para así diseñar políticas de construcción de largo plazo que consideren factores climáticos y ambientales, como son la escasez de agua o los cambios abruptos de temperatura y luminosidad a lo largo del año. El estudio muestra las virtudes de la metodología de análisis empleado, aunque no se debe olvidar que el mismo es altamente demandante de información para determinar tanto los costos como beneficios de las diferentes opciones a analizar.

REFERENCIAS

- Adnot, J., Orphelin, M., Carretero, C., Marchio, D., Waide, P., Carre, M., Lopes, C., Cediel, G. Á., Santamouris, M., Klitsikas, N., Mebane, B., Presutto, M., Rusconi, E., Ritter, H., Becirspahic, S., Giraud, D., Bossoken, E., Meli, L., Casandrini, S. & Auffret, P. (1999). *Energy efficiency of room air conditioners (EERAC)* (Final Report, Contract DGXVII4.1031/D/97.026). USA: Directorate-General for Energy (DGXVII) of the Commission of the European Communities.
- Ang, B. W., Goh, T. N. & Liu, X. Q. (1992). Residential electricity demand in Singapore, *Energy*, 17(1), 37-46.
- DOE2.com. (2012). *Programa de análisis de edificios*. Recuperado en mayo de 2012 de <http://doe2.com/>
- Fonseca G. L. G., López, M. A. S. & Ornelas, L. M. (2003). La denuncia del Senador Bartlett y el Diputado Rocha ante la Auditoría Superior de la Federación, *Red Energética*, 1(10), 5-7, junio.
- Halverson, M. A., Stucky, D. J., Friedrich, M., Godoy-Kain, P., Keller, J. M. & So-masundaram, S. (1994). *Energy-Effective and Cost-Effective Building Energy Conservation Measures for Mexico* (Report submitted to U.S. Agency for International Development). Richland, Washington: Pacific Northwest Laboratory.
- Heard, C. & García, L. E. (2011). *Modelado de cargas térmicas en edificios*. México, D.F.: Facultad de Ingeniería-UNAM.
- Heard, C. L. & Ramos, N. G. (1997). *Revisión del anteproyecto de norma de sistemas de techos y muros en edificaciones para uso residencial hasta tres niveles en función de su comportamiento térmico*, IIE/11/10706/1001/F/D/IV1.
- Heard, C. L. & Ramos, N. G. (1998). *Elaboración de los proyectos de norma de eficiencia energética en edificios no residenciales y en edificaciones para uso habitacional hasta de tres pisos*. (Informe parcial: Manifestación de impacto regulatorio. INFORME_PROYECTO_11416_3).
- Hufschmidt, M. M. (2000). Benefit-Cost Analysis: 1933-1985. *Journal of Contemporary Water Research and Education University North Carolina*, 116(1), 42-49.
- Huerta, V. V. (2002). *Análisis del anteproyecto de norma-020-ENER sobre eficiencia energética en edificaciones residenciales hasta tres niveles* (Tesis de maestría). División de Ciencias y Artes para el Diseño-Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Azcapotzalco, México.
- International Energy Agency (IEA). (2002). *Energy Policies of IEA countries: Greece 2002 Review*. Paris: OECD/IEA.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2010). *Censo de población y vivienda 2010*. Recuperado el 12 de mayo de 2012 de <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/TabuladosBasicos/Default.aspx?c=27302&s=est>
- Mosiño, P. A. (1969). *Factores determinantes del clima en la República Mexicana con referencia especial a las zonas áridas* (Volumen no. 19). México: Departamento de Prehistoria-INAH.
- Perry, R. H. & Green, D. W. (1997). *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (7th Edition). United States: McGraw-Hill.
- Rivas, V. A. (1994). *Análisis de costo-beneficio NOM-000-ENER-1994. Anteproyecto de norma oficial mexicana de eficiencia energética integral en edificios no-residenciales*, 15 de abril de 1994.
- Romero-Moreno, R. A. (1994). La vivienda representativa de Mexicali: caracterización física, social y lineamientos de adecuación ambiental (Tesis de maestría). Facultad de Arquitectura, Universidad Autónoma de Baja California: Mexicali.
- Rodríguez, V. M. (2005). *Introducción a la arquitectura bioclimática*. México: LI-MUSA / UAM.
- Secretaría de Energía (Sener). (2002). *Prospectiva del sector eléctrico 2002-2011* (2002). México: Dirección General de Formulación de Política Energética. Sener.

ANEXO

Tabla 5.

Materiales de construcción considerados para casas tipo.

Descripción de la capa		Grueso (mm)	Conductividad térmico (W/m.K)	Densidad (kg/m³)	Capacidad térmica (kJ/kg.K)
Muro colindante de block	Block hueco de baja densidad de 101.6mm	10	0.3846	1041	0.837
	Estucco 25.4mm	25	0.7212	1858	0.837
Muro externo con aislante	Poliestereno de 12.7mm	13	0.0346	29	1.214
	Block hueco de baja densidad de 101.6mm	101	0.3846	1041	0.837
Puerta de acero sencillo	Valor global de conductividad (W/m².K)	8			
	Papel asfaltado - resistencia térmica (m².K/W)	0.0264			
Techos	Poliestereno de 12.7mm	13	0.0346	29	1.214
	Concreto colado	101	0.3605	1281	0.837
	Capa horizontal de aire - resistencia térmica (m².K/W)	0.1197			
Piso	Suelo	305	1.7307	1842	0.837
	Piedra	25	1.8027	2243	0.837
	Concreto colado	101	0.3605	1281	0.837
	Linoleo - resistencia térmica (m².K/W)	0.0088			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6.

Cargas térmicas internas para días entre semana (W).

Hora del día	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
Persona sedentaria	246	246	246	246	246	246															123	308	308	246	
Persona ligeramente activa							299	299																	
Persona activa									101	101															
Persona comiendo																		299	299	299	299	299			
Iluminación																		420	420	420	520	100			
Refrigerador	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Cocina dos quemadores								938										938							
Estéreo							120																		
Televisor a color																		200	200	200	200	400	400	400	
Calor latente																									
Persona sedentaria	164	164	164	164	164	164																			
Persona ligeramente activa							299	299														82	205	205	164
Persona activa									204	204															
Persona comiendo																		374	374	374	374	374			
Cocina dos quemadores								528										528							

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7.

Cargas térmicas internas para días fin de semana y días festivos (W).

Hora del día	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24			
Persona sedentaria	246	246	246	246	246	246	246	246															123	246	246		
Persona ligeramente activa									299						299	299									149		
Persona activa										202	202	202	202	202													
Persona comiendo																		299	299	299	299	299					
Iluminación																			520	520	520	780	390	260	130		
Refrigerador	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60		
Cocina dos quemadores										938									938								
Estéreo									120	120	120	120	120														
Televisor a color									200	200	200		200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	400	400	200	200
Calor latente																											
Persona sedentaria	164	164	164	164	164	164	164	164																			
Persona ligeramente activa									299						299	299							82	82	164	164	
Persona activa										407	407	407	407	407											149		
Persona comiendo																			374	374	374	374	377				
Cocina dos quemadores										528				528	528				528								

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8.

Materiales de construcción considerados para edificios multifamiliares.

	Descripción de la capa	Grueso (mm)	Conductividad térmico (W/m.K)	Densidad (kg/m ³)	Capacidad térmica (kJ/kg.K)
Muro colindante de block	Block hueco de baja densidad de 101.6mm	10	0.3846	1041	0.837
Muro externo con aislante	Estucco 25.4mm	25	0.7212	1858	0.837
	Poliestereno de 12.7mm	13	0.0346	29	1.214
	Block hueco de baja densidad de 101.6mm	101	0.3846	1041	0.837
Puerta de acero sencillo	Valor global de conductividad (W/m ² .K)	8			
Techos	Papel asfaltado - resistencia térmica (m ² .K/W)	0.0264			
	Poliestereno de 12.7mm	13	0.0346	29	1.214
	Concreto colado	101	0.3605	1281	0.837
	Capa horizontal de aire - resistencia térmica (m ² .K/W)	0.1197			
Piso planta baja	Suelo	305	1.7307	1842	0.837
	Piedra	25	1.8027	2243	0.837
	Concreto colado	101	0.3605	1281	0.837
Piso entre niveles	Linoleo - resistencia térmica (m ² .K/W)	0.0088			
	Yeso	13	0.1603	801	0.837
	Concreto colado	152	1.3112	2242	0.837
	Linoleo - resistencia térmica (m ² .K/W)	0.0088			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9.

Costos de aislamiento térmico (Heard & Ramos, 1998).

Descripción	Costo (M.N.)	Costo (M.N.) estimado a septiembre de 2003
Material: Poliestireno expandido		
Costo del material \$m-2cm-1	\$2.98	\$5.97
Costo para sujetar el aislante \$m-2	\$27.40	\$54.87
Costo del acabado exterior del aislante \$m-2	\$14.00	\$28.04
Costo de mano de obra \$m-2cm-1	\$17.00	\$36.73
Material: Espuma de poliuretano		
Costo del material \$m-2cm-1	\$7.28	\$14.58
Costo para sujetar el aislante \$m-2	\$27.40	\$54.87
Costo del acabado exterior del aislante \$m-2	\$18.00	\$36.05
Costo de mano de obra \$m-2cm-1	\$20.00	\$43.21

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10.

Costos de aislamiento térmico, marzo de 2002 (Huerta, 2002).

Descripción	Costo (M.N.)	Costo (M.N.) estimado a septiembre de 2003
Material: Poliestireno expandido		
Costo del material \$m-2cm-1	\$15.14	\$16.44
Costo instalación \$m-2	\$38.80	\$41.23
Costo del acabado exterior del aislante \$m-2 (Cartón de polietileno para techos)	\$2.52	\$2.74

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11.

Resultados del estudio CB para Monterrey.

Consumo anual de energía eléctrica (kWh)	Costo anual de energía eléctrica (\$ M.N.)	Tamaño de la unidad de aire acondicionado (T.R.)	Aislamiento térmico promedio de la envolvente de la vivienda (m ² KW ⁻¹)	Inflación anual del costo de la factura eléctrica: julio 2002 a julio 2003* (%)	Valor presente del aislamiento térmico (\$ M.N.)	Beneficio/costo en valor presente
6235	\$11 086.88	2.26	0.43	17.31%*	0	0.00
5140	\$8 859.86	1.88	0.74	17.32%*	\$45 402.491815	2.50
4747	\$6 315.43	1.68	1.04	7.53%	\$29 449.606378	1.94
4403	\$5 692.03	1.51	1.62	7.58%	\$34 462.380572	1.99
4300	\$5 505.41	1.53	2.17	7.60%	\$33 192.749077	1.86
4185	\$5 297.06	1.38	2.68	7.62%	\$32 741.607692	1.79
4103	\$5 148.51	1.35	3.64	7.64%	\$27 387.763594	1.56
4043	\$5 039.83	1.32	4.91	7.66%	\$17 751.38908	1.29

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12.

Resultados del estudio CB para México, D.F.

Consumo anual de energía eléctrica (kWh)	Costo anual de energía eléctrica (\$ M.N.)	Tamaño de la unidad de aire acondicionado (T.R.)	Aislamiento térmico promedio de la envolvente de la vivienda (m ² KW ⁻¹)	Inflación anual del costo de la factura eléctrica: julio 2002 a julio 2003* (%)	Valor presente del aislamiento térmico (\$ M.N.)	Beneficio/costo en valor presente
2130	\$2 165.6	0.33	0.43	8.49%	\$0.00	0.00
1796	\$1 563.8	0.24	0.74	9.15%	(\$22 221.04)	0.28
1728	\$1 440.6	0.23	1.04	9.39%	(\$22 010.53)	0.33
1700	\$1 390.7	0.23	1.62	9.52%	(\$24 887.09)	0.32
1705	\$1 399.5	0.23	2.17	9.49%	(\$28 770.80)	0.29
1712	\$1 411.8	0.23	2.68	9.47%	(\$32 709.20)	0.26
1719	\$1 424.0	0.22	3.64	9.44%	(\$40 382.40)	0.22
1728	\$1 440.9	0.22	4.91	9.39%	(\$51 882.03)	0.17

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13.

Resultados del estudio CB para Mérida.

Consumo anual de energía eléctrica (kWh)	Costo anual de energía eléctrica (\$ M.N.)	Tamaño de la unidad de aire acondicionado (T.R.)	Aislamiento térmico promedio de la envolvente de la vivienda (m^2KW^{-1})	Inflación anual del costo de la factura eléctrica: julio 2002 a julio 2003* (%)	Valor presente del aislamiento térmico (\$ M.N.)	Beneficio/costo en valor presente
7702	\$9 903.40	3.06	0.43	8.38%	\$0.00	0.00
6423	\$7 594.99	2.29	0.74	8.80%	\$3 810.91	1.13
5995	\$6 822.44	2.1	1.04	9.01%	\$14 363.34	1.47
5638	\$6 178.04	1.93	1.62	9.23%	\$21 496.35	1.64
5472	\$5 878.39	1.85	2.17	9.34%	\$23 056.50	1.62
5374	\$5 701.50	1.81	2.68	9.42%	\$22 563.74	1.56
5329	\$5 620.16	1.89	3.64	9.46%	\$16 265.14	1.34
5268	\$5 510.00	1.87	4.91	9.52%	\$7 098.79	1.12

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14.

Resultados del estudio CB para Villahermosa.

Consumo anual de energía eléctrica (kWh)	Costo anual de energía eléctrica (\$ M.N.)	Tamaño de la unidad de aire acondicionado (T.R.)	Aislamiento térmico promedio de la envolvente de la vivienda (m^2KW^{-1})	Inflación anual del costo de la factura eléctrica: julio 2002 a julio 2003* (%)	Valor presente del aislamiento térmico (\$ M.N.)	Beneficio/costo en valor presente
9574	\$13 282.14	5	0.43	8.05%	\$0.00	0.00
8294	\$10 972.16	4.22	0.74	8.26%	\$2 391.88	1.08
7815	\$10 107.70	3.94	1.04	8.36%	\$13 487.02	1.45
7369	\$9 302.78	3.7	1.62	8.47%	\$22 002.94	1.67
7162	\$8 929.16	3.59	2.17	8.53%	\$24 084.38	1.66
7038	\$8 705.35	3.53	2.68	8.57%	\$23 875.34	1.60
6899	\$8 454.45	3.46	3.64	8.61%	\$20 361.67	1.43
6792	\$8 261.34	3.4	4.91	8.65%	\$12 237.67	1.21

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15.

Resultados del estudio CB para Ciudad Juárez.

Consumo anual de energía eléctrica (kWh)	Costo anual de energía eléctrica (\$ M.N.)	Tamaño de la unidad de aire acondicionado (T.R.)	Aislamiento térmico promedio de la envolvente de la vivienda (m^2KW^{-1})	Inflación anual del costo de la factura eléctrica: julio 2002 a julio 2003* (%)	Valor presente del aislamiento térmico (\$ M.N.)	Beneficio/costo en valor presente
4930	\$6 896.68	1.54	0.43	7.33%	\$0.00	0.00
3877	\$4 990.15	1.06	0.74	7.42%	\$5 786.23	0.81
3551	\$4 399.66	0.93	1.04	7.47%	\$405.01	1.01
3272	\$3 894.42	0.81	1.62	7.53%	\$3 623.24	1.10
3151	\$3 675.34	0.76	2.17	7.56%	\$2 982.64	1.08
3057	\$3 505.17	0.69	2.68	7.59%	\$1 767.95	1.04
2987	\$3 378.51	0.66	3.64	7.62%	\$3 892.50	0.92
2935	\$3 284.43	0.64	4.91	7.64%	\$13 725.36	0.77

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16.
Resultados del estudio CB para Palestina, Coahuila.

Consumo anual de energía eléctrica (kWh)	Costo anual de energía eléctrica (\$ M.N.)	Tamaño de la unidad de aire acondicionado (T.R.)	Aislamiento térmico promedio de la envolvente de la vivienda (m^2KW^{-1})	Inflación anual del costo de la factura eléctrica: julio 2002 a julio 2003* (%)	Valor presente del aislamiento térmico (\$ M.N.)	Beneficio/costo en valor presente
6053	\$10 712.68	2.44	0.43	17.31%*	\$0.00	0.00
4907	\$8 402.23	1.82	0.74	17.32%*	\$48 960.50	2.66
4541	\$6 004.65	1.62	1.04	7.51%	\$29 296.99	1.95
4221	\$5 426.27	1.45	1.62	7.57%	\$33 725.71	1.99
4075	\$5 162.32	1.37	2.17	7.60%	\$33 800.61	1.90
3989	\$5 006.86	1.33	2.68	7.62%	\$32 328.84	1.79
3893	\$4 833.23	1.28	3.64	7.64%	\$27 385.93	1.57
3822	\$4 704.86	1.24	4.91	7.66%	\$18 073.26	1.30

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 17.
Resultados del estudio CB para Nuevo Laredo.

Consumo anual de energía eléctrica (kWh)	Costo anual de energía eléctrica (\$ M.N.)	Tamaño de la unidad de aire acondicionado (T.R.)	Aislamiento térmico promedio de la envolvente de la vivienda (m^2KW^{-1})	Inflación anual del costo de la factura eléctrica: julio 2002 a julio 2003* (%)	Valor presente del aislamiento térmico (\$ M.N.)	Beneficio/costo en valor presente
7984	\$10 426.19	3.46	0.43	8.07%	\$0.00	0.00
6569	\$7 884.96	2.61	0.74	8.39%	\$6 105.24	1.21
6043	\$6 931.89	2.29	1.04	8.59%	\$19 128.05	1.65
5577	\$6 087.61	2.04	1.62	8.82%	\$29 161.45	1.89
5363	\$5 699.90	1.92	2.17	8.95%	\$32 107.07	1.89
5240	\$5 477.08	1.86	2.68	9.04%	\$32 343.14	1.82
5101	\$5 225.26	1.79	3.64	9.15%	\$29 454.90	1.63
4996	\$5 035.03	1.74	4.91	9.24%	\$21 841.16	1.38

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 18.
Resultados del estudio CB para Matamoros.

Consumo anual de energía eléctrica (kWh)	Costo anual de energía eléctrica (\$ M.N.)	Tamaño de la unidad de aire acondicionado (T.R.)	Aislamiento térmico promedio de la envolvente de la vivienda (m^2KW^{-1})	Inflación anual del costo de la factura eléctrica: julio 2002 a julio 2003* (%)	Valor presente del aislamiento térmico (\$ M.N.)	Beneficio/costo en valor presente
6216	\$11 049.23	2.63	0.43	17.31%*	\$0.00	0.00
5207	\$8 988.76	1.99	0.74	17.32%*	\$40 551.01	2.38
4876	\$8 319.71	1.80	1.04	17.32%*	\$62 049.77	3.02
4604	\$6 058.83	1.64	1.62	7.56%	\$29 917.52	1.88
4480	\$5 834.10	1.55	2.17	7.58%	\$29 473.27	1.79
4420	\$5 725.39	1.51	2.68	7.59%	\$27 309.53	1.67
4391	\$5 672.81	1.57	3.64	7.60%	\$20 347.86	1.42
4338	\$5 576.80	1.54	4.91	7.61%	\$10 524.17	1.18

Fuente: Elaboración propia.