

ANÁLISIS COMPARATIVO DE EMISIONES DE CO₂ Y SU IMPACTO ECONÓMICO EN DOS COMPLEJOS HABITACIONALES DE MEXICALI, MÉXICO

Néstor SANTILLÁN SOTO¹, Rafael GARCÍA CUETO¹, Gabriela PEÑUELAS GARCÍA¹,
José Ernesto LÓPEZ VELÁZQUEZ¹, Sara OJEDA BENÍTEZ¹,
Nicolás VELÁZQUEZ LIMÓN¹, Samantha CRUZ SOTELO²

¹*Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Blvd. Benito Juárez
y calle de la Normal s/n Col. Insurgentes Este, C.P. 21280.*

²*Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Campus Mexicali.
nsantillan@uabc.edu.mx, rafaelcueto@uabc.edu.mx, gabriela.penuelas@uabc.edu.mx,
ernesto.lopez16@uabc.edu.mx, sara.ojeda.benitez@uabc.edu.mx, nicolas.velazquez@uabc.edu.mx,
samantha.cruz@uabc.edu.mx*

RESUMEN

Los riesgos climáticos a nivel urbano son promovidos principalmente por los cambios de coberturas que la urbanización impone. Esos cambios alteran la temperatura en la baja atmósfera y pone en riesgo a sus habitantes. En la ciudad de Mexicali, México, durante buena parte del año prevalecen altas temperaturas, por lo que se requieren equipos de aire acondicionado para satisfacer el confort térmico. En esta comunicación se evalúa el impacto energético, económico y ambiental como resultado de una urbanización no planificada. Se presenta una comparación teórica del desempeño de un equipo de 5 toneladas operando en dos zonas urbanas. Una de ellas presenta planeación homogénea, la otra crecimiento heterogéneo. Utilizando un anemómetro sónico ubicado a 20 metros de altura, se registraron las temperaturas del aire en ambos sitios. Estos datos se procesaron en un modelo de regresión lineal deducido del manual del equipo. Se sustituyeron las temperaturas registradas, obteniéndose el consumo eléctrico. Los resultados indican que la zona heterogénea consume 24,700 kWh por encima de la planificada; generando un costo extra de \$3,195 USA y emitiendo 17,032 kg de CO₂. Se discuten algunas implicaciones que generan estos dos diferentes esquemas de distribución urbana.

Palabras clave: aire acondicionado, consumo de energía, emisiones de CO₂, urbanización.

ABSTRACT

At urban level, climate risks are promoted primarily by changes in coverage that urbanization imposes. These alter the temperature in the lower atmosphere and threatens its inhabitants. In the city of Mexicali, Mexico, for much of the year prevailing high temperatures, so air conditioner equipment are required. In this communication, energy, economic and environmental impacts as a result of unplanned urbanization is evaluated. A theoretical performance comparison of a 5 tons equipment operating in two urban areas is presented. One presents homogeneous planning, the other heterogeneous growth. Using a sonic anemometer located 20 meters high, air temperatures were recorded at

both sites. These data were processed in a linear regression model deducted from the equipment manual. The registered temperatures were replaced, obtaining electricity consumption. The results indicate that the heterogeneous zone consumes 24,700 KWh above the planned; generating an extra cost of \$ 3,195 USA and issuing 17,032 kg of CO₂. Some implications generated by these two different urban distribution schemes are discussed.

Key words: air conditioning, energy consumption, CO₂ emissions, urbanization.

1. INTRODUCCIÓN

La evaluación de la energía, de los beneficios económicos y ambientales son los parámetros que algunas investigaciones y políticas han abordado referente a equipos de aire acondicionado (A.C.) dadas las crecientes demandas de crecimiento urbano (Pérez-Lombard *et. al.*, 2011). Para las ciudades actuales ubicadas en climas extremos con altas temperaturas, los sistemas de aire acondicionado representan el factor dominante en el consumo eléctrico en viviendas y edificios. En tales ciudades, la prioridad es mejorar la eficiencia en el uso de electricidad para el aire acondicionado, y por lo tanto, una medida central para la conservación de los recursos energéticos y la protección del medio ambiente (Yik *et. al.*, 2001).

Los edificios han jugado un papel importante para el consumo de energía en los sectores residencial y comercial, este consumo se ha incrementado de manera constante, los indicadores que oscilan entre el 20% y el 40% en los países desarrollados, han superado a otros grandes sectores como el industrial y de transporte. Para los edificios, el servicio de más rápido crecimiento es el uso de la energía para los sistemas de A.C., y es particularmente significativo debido a que representa el 50% del consumo en los edificios y el 20% del consumo total en los Estados Unidos de América (Pérez-Lombard *et. al.*, 2008; Al-Rabghi y Akyurt, 2004), para Malasia el 57% para A.C., que vino a ser el de mayor consumo de energía (Saidur, 2009), y en particular en la demanda de energía del Sur de Asia, ya que el aire acondicionado residencial podrían aumentar en un 50% debido al cambio climático (Isaac y Van Vuuren, 2009).

Scott (1994) y Huang (1986) documentaron para ciudades de Estados Unidos, un impacto significativo del consumo de energía en edificios debido a las fluctuaciones del clima, esto debido a las condiciones climáticas que juegan un papel decisivo en el consumo de electricidad (Sailor, 2009). Las estimaciones de los modelos climáticos relacionan los parámetros climáticos con el consumo de electricidad residencial (Ihara, 2008), y sugieren una sensibilidad nominal de 2-4% por cada grado Celsius de aumento de las temperaturas (Sailor y Pavlova, 2003).

Como factor de variabilidad del clima urbano, en las últimas décadas, la importancia de la isla de calor no sólo se ha analizado en términos de la climatología urbana, también se estudia como un aspecto que ha generado efectos ambientales negativos (Kikegawa *et. al.*, 2006) y, como consecuencia si la isla de calor aumenta, la demanda de energía eléctrica para el A.C. también. Este impacto negativo genera calor residual y también provoca aumentos en el consumo de combustibles fósiles. Por lo tanto, si este fenómeno persiste, surge un alto riesgo debido a que las islas de calor aumentan sin control el consumo de energía eléctrica y, en consecuencia, aumentan los gases de efecto invernadero antropogénicos como el CO₂, que está directamente relaciona-

do como la principal causa del cambio climático global. De acuerdo con el enfoque anterior, las estrategias de mitigación contra las islas de calor deben ser propuestas como una herramienta para reducir el consumo de energía en las ciudades, y estas estrategias deben dar lugar a la reducción global de las emisiones de CO₂ (Kikegawa et. al, 2006). Es de destacar que en México se estima que las emisiones de CO₂ por combustible/electricidad relacionadas con aire acondicionado doméstico o el consumo de energía de enfriamiento, fue de 5.5 Tg de CO₂ en 2006 (Rosas-Flores et. al, 2011). Algunos datos indican que a nivel mundial las emisiones de CO₂ asociadas, tanto para la calefacción y la refrigeración se incrementará a 2.2 Gt de C en 2100, es decir, aproximadamente el 12% de las emisiones totales de CO₂ derivadas del uso energético, destaca China y U.S.A. (Isaac y Van Vuuren, 2009).

Teniendo en cuenta el consumo de energía y los posibles efectos ambientales como los antes mencionados, este estudio presenta un enfoque comparativo en dos zonas residenciales de la ciudad de Mexicali, México, donde cada zona presenta diferencias en su distribución urbana, que crean diferentes microclimas en el que se opera teóricamente una equipo de A.C. de 5 toneladas en cada casa. Esta comunicación es analizada y discutida en términos de consumo de energía, los impactos económicos y efectos ambientales.

2. MÉTODOS

2.1. Sitios y datos

La investigación se realizó en la ciudad de Mexicali, Baja California, México, que se encuentra en una zona semi-desértica, con coordenadas 32 ° 39'48 "N, 115 ° 28'4" W. En esta ciudad se han registrado temperaturas extremas, en julio una máxima promedio de 42.2°C, y en enero una mínima promedio de 21°C. El 28 de julio de 1995, que alcanzó un máximo histórico de 52°C (Santillán-Soto et. al, 2013). Dos anemómetros sónicos CSAT3, se instalaron a 20 m de altura mediante maquinaria de elevación dentro de dos complejos habitacionales separados por 9 km. de distancia. Uno de ellos SEV el cual presenta un esquema planificado de urbanización homogénea denominado fraccionamiento, con solo dos diseños de casa habitación, con la característica de que todos los techos son de color blanco, destacando que prácticamente los terrenos sin construcción y áreas verdes son muy pocos. El otro sitio denominado CUE, correspondiente a una urbanización heterogénea tradicional donde todas las casas se construyeron según las posibilidades y el gusto del dueño, destaca que los techos de las casas no presentan una cobertura similar, cada una está construida con diferentes materiales, se cuenta con pocas áreas verdes y a diferencia del sitio SEV, existen terrenos sin construcción.

Al mismo tiempo, los equipos de adquisición de datos CR3000 registraron datos promedio cada 60 minutos durante 25 días (Figuras 1 y 2). Los sensores se colocaron a la altura antes dicha para así obtener datos más representativos de la zona, más estable y con menos turbulencia proveniente de los equipos de aire acondicionados instalados en los techos de las casas. Las edificaciones más altas circundantes a la estación presentaban una altura máxima de 6 m aproximadamente. El período de análisis fue del 20 de marzo al 14 de abril de 2015.

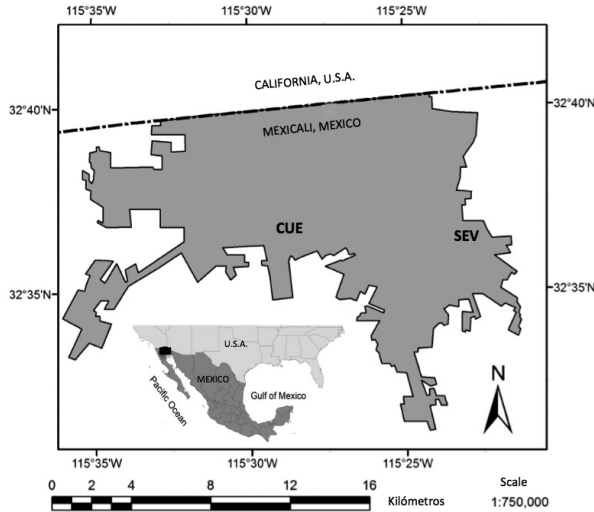


Fig. 1. Sitios de estudio.



Fig. 2. Estaciones de anemómetros sónicos a 20 m. altura.

Las temperaturas registradas durante los 25 días se procesaron como promedios horarios y se presentan en la Figura 3. Como se puede apreciar, CUE presenta valores más altos, esto puede relacionarse con la presencia de terrenos sin construcción y techos poco reflectivos. Por otra parte, para SEV los techos blancos permiten reflejar más energía proveniente de la radiación solar, lo que puede ser un factor influyente para temperaturas menores circundantes a la estación de monitoreo. Para este trabajo, estas temperaturas serán utilizada como datos de entrada.

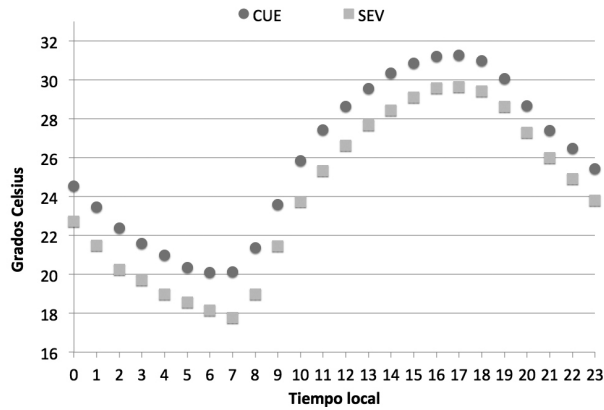


Fig. 3. Temperaturas promedio horarias en los dos sitios de estudio.

2.2. Tecnologías de aire acondicionado

Se consideraron tres tipos de tecnologías de equipos de 5 toneladas. Esta capacidad no está relacionada con la carga térmica de algún tipo de casa habitación, solo se consideró como un equipo “testigo” trabajando continuamente por 25 días bajo las temperaturas registradas en cada sitio. Su comportamiento de consumo de energía en condiciones de prueba fueron documentadas de las especificaciones del fabricante (Goodman Air Conditioning & Heating, 2016; York Heating and Air conditioning, 2009; Faramazi et. al, 2004). La figura 4 muestra en términos de temperatura la energía consumida para obtener 23.8 C° (75° F) de temperatura interior. La tecnología más moderna (KW_G) presentó la menor pendiente y fue seleccionada para este estudio debido a que es más eficiente. Las letras "G" y "Y" son nuevas tecnologías cargadas con refrigerante R410 (las letras representan el nombre de la empresa). La tecnología con refrigerante R-22 se presenta con la letra "O". Esta última es obsoleta y sólo se presenta en forma comparativa.

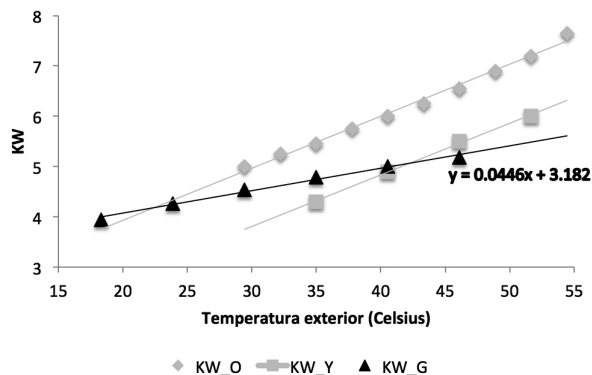


Fig. 4. Modelos de regresión de los tres equipos de aire acondicionado de 5 toneladas deducidos de las temperaturas externas del manual del fabricante.

Después de obtener el modelo de regresión lineal, la variable independiente “x” es decir la temperatura exterior a la que realmente funcionan los equipos de aire acondicionado, se propone en los dos sitios de estudio como valor de entrada (Figura 3), y fue sustituida en el modelo de regresión (Ecuación 1) con el fin de obtener el consumo eléctrico por hora (KWh), para posteriormente, sumar todos los resultados horarios, y obtener una suma diaria para cada uno de los 25 días (Ecuación 2).

$$y=0.0446x+3.182 \tag{1}$$

$$\sum_{i=0}^{n=23 \text{ hr}} KWhD1, \sum_{i=0}^{n=23 \text{ hr}} KWhD2, \dots, \sum_{i=0}^{n=23 \text{ hr}} KWhD25 \tag{2}$$

En la Ecuación 2, D1 a D25 significan primer día hasta el día veinticinco.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los siguientes resultados corresponden al consumo de energía por día de los aparatos de aire acondicionado de 5 toneladas en los dos sitios de estudio, el costo total para el período considerado y algunos datos sobre las emisiones de CO₂ como resultado de la operación excedente debido al ambiente externo con temperaturas más altas. Como se muestra en la Figura 5, el consumo de energía en el sitio CUE es mayor que en el sitio SEV. Estos resultados fueron sustituidos en el modelo de regresión lineal de consumo del equipo KW_G, estos valores más elevados para CUE nos indican que el microclima que rodea el sitio presenta influencias térmicas que elevan las temperaturas de la zona y aumenta el consumo de energía. La diferencia entre cada sitio también puede ser observada debido a que el diferencial de temperatura promedio es 1.8 Celsius (Tabla 1). El excedente eléctrico del sitio CUE por casa ((2603.5-2554.1)/4.25), equivale a 11 días de consumo de energía para el sitio SEV, considerando un promedio diario de 4.25 KWh en este último, esto significa que 500 casas pueden ser refrigerados 11 días adicionales (Tabla 1).

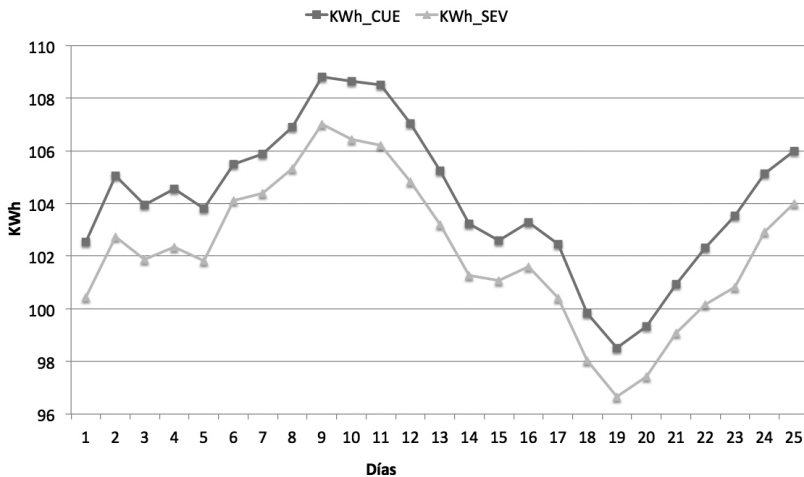


Fig. 5. Acumulado diaria de consumo eléctrico calculado por el modelo de regresión.

Concepto/variable	CUE	SEV
Temperatura promedio (°C)	25.9	24.1
KWh acumulados por casa	2603.5	2554.1
KWh promedio por casa	4.33	4.25
KWh Total para 500 casa	1,301,750	1,277,050
Costo por casa dólares norteamericanos	338.45	332.06
Costo total dólares norteamericanos para 500 casas	169,225	166,030
Emisiones totales Kg. CO ₂ Equivalente	897,623	880,591
Δ KWh (excedente)	24,700	
Δ\$ (excedente)	3,195	
Δ Emisiones (excedente)	17,032	

Tabla 1: Variables de análisis para los sitios de estudio

Notas:

- 1) El costo promedio del KWh se considera en 2.22 pesos mexicanos equivalentes a 0.13 dólares norteamericanos.
- 2) Se consideran 500 casas para cada sitio con un equipo de 5 toneladas cada una.

El impacto económico también es un factor que se ve afectado, ya que el costo total aumenta un 1.9%, pero profundizando en un análisis detallado, como se muestra en la Tabla 1, la diferencia en el costo por casa es de \$ 6.39, lo que representa 1.52 veces el salario mínimo diario en México (73.04 pesos = \$4.19), por lo que el excedente del costo total asciende a el salario mínimo diario de 762 trabajadores.

En un enfoque ambiental, según las proyecciones de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (E.P.A., 2016), la diferencia de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) entre los dos sitios se muestran en la siguiente tabla.

Δ Kilowatt-hour = Δ Emisiones	Equivalencias de GEI
24,700 KWh = 17,032 Kg. CO ₂	1916 galones de gasolina consumidos
	1.6 energía anual de una casa
	2.3 electricidad de una casa durante un año
	6.1 Toneladas de basura enviadas al basurero
	446 Lámparas incandescentes cambiadas a lámparas fluorescentes compactas
	49.6 Barriles de petróleo consumido

Tabla 2: Consumo excedente en KWh, CO₂ y equivalentes

La Tabla 2 muestra claramente que el exceso de energía impone cargas adicionales sobre el medio ambiente. En primer lugar la equivalencia de KWh se establece de acuerdo con los Kg de CO₂ generados (columna izquierda), en la siguiente columna los conceptos descritos son algunas estimaciones calculadas en el referido sitio web,

introduciendo como dato de entrada el exceso de energía. Al tratarse de un enfoque residencial, se destacan dos conceptos relacionados con el consumo de energía en los hogares: 1) el uso de energía para 1.6 hogares durante un año y 2.3 veces la electricidad utilizada durante un año para una casa. Estos resultados nos dan una idea del impacto ambiental que 500 equipos de aire acondicionado causan cuando se trabajan en condiciones más severas, como una zona urbana con temperaturas más altas respecto a otra. Debido a los aspectos antes mencionados, y coincidiendo con (Mahlia *et. al*, 2002), podemos establecer que los impactos económicos y ambientales son una función de la utilización y ahorro de energía, también son factores dominantes primarios que determinan el consumo de energía y las emisiones de GEI: la ubicación, la tipología de las viviendas, su densidad, diseño y materiales (Fuller y Crawford, 2011; Guo *et. al*, 2014).

4. CONCLUSIONES

Los aspectos relacionados con el desarrollo de las ciudades sin duda se manifiestan en el suministro de energía, el costo de los servicios y efectos ambientales. El análisis de estos aspectos pueden ser factores determinantes que permitan a los urbanistas proponer esquemas que reduzcan las diferencias térmicas dentro de la ciudad debido a una distribución urbana incorrecta, y por lo tanto, minimizar la formación de microclimas no deseados, promoviendo quizás, reglamentos para que los techos sean pintados de colores reflectivos y se establezca un mejor aprovechamiento de los terrenos libres de construcción para incrementar la presencia de zonas verdes y promover así temperaturas que impliquen menor rigor térmico a los equipos acondicionadores. En particular, derivado de esta comunicación se puede concluir que: los excedentes de consumo de energía aumentan el costo y las emisiones contaminantes cuando un aire acondicionado funciona en un área con temperaturas más altas dentro de la misma ciudad.

Será entonces importante controlar la distribución urbana, los cambios de uso del suelo, la demanda de energía, las implicaciones económicas tanto para los consumidores como para las empresas de generación de energía y no menos importante, el daño ambiental debido a las emisiones de G.E.I.

Debe tenerse en cuenta que los resultados de este estudio son principalmente un análisis exploratorio, asociado con variables medibles. Un siguiente paso podría ser identificar la magnitud de las islas de calor urbanas en los sitios de estudio, la amplificación de las mediciones y también utilizar termografía infrarroja con el fin de identificar las influencias térmicas que aumentan las temperaturas. Además dentro de esta futura etapa será necesario una evaluación-simulación térmica que permita conocer a detalle la demanda energética y posteriormente seleccionar la mejor tecnología acondicionadora para climas extremos y adoptar nuevas propuestas que minimicen el impacto energético, económico y ambiental (Yik F.W.H. *et. al*, 2001)

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el recurso brindado para la realización de este proyecto.

REFERENCIAS

- Al-Rabghi, O.M., Akyurt, M.M. (2004). A survey of energy efficient strategies for effective air conditioning. *Energy Conversion and Management*, 45, 1643–1654.
- E.P.A. (2016). Greenhouse Gas Equivalencies Calculator. United States Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gas-equivalencies-calculator> (accesado en Marzo 17, 2016).
- Faramarzi, R., Coburn, B., Sarhadian, R., Mitchell, S., Pierce, R.A. (2004). Performance Evaluation of Rooftop Air Conditioning Units At High Ambient Temperatures. *Actas del European Council for an Energy Efficient Economy*, panel 3, paper 5, 52-63. http://www.eceee.org/library/conference_proceedings/ACEEE_buildings/2004/Panel_3/p3_5
- Fuller, R.J., Crawford, R.H. (2011). Impact of past and future residential housing development patterns on energy demand and related emissions. *Journal of Housing and the Built Environment*, 26: 165-183.
- Goodman Air Conditioning & Heating (2014). Product especificacions. <http://www.goodmanmfg.com/Portals/0/pdf/SS/SS-GPC14H.pdf>
- Guo, J., Liu, H., Jiang, Y., He, D., Wang, Q., Meng, F., He, K. (2014). Neighborhood form and CO₂ emission: evidence from 23 neighborhoods in Jinan, China. *Front. Environ. Sci. Eng.*, 8(1), 79–88.
- Huang, Y.J., Ritschard, R., Bull, J., Chang, L. (1987). Climatic indicators for estimating residential heating and cooling loads. Lawrence Berkeley Laboratory report LBL-21101. <https://publications.lbl.gov/islandora/object/ir%3A88480>
- Ihara, T., Kikegawa, Y., Asahi, K., Genchi, Y., Kondo, H. (2008). Changes in year-round air temperature and annual energy consumption in office building areas by urban heat-island countermeasures and energy-saving measures. *Applied Energy*, 85, 12–25.
- Isaac, M., Van Vuuren, D. (2009). Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change. *Energy Policy*, 37: 507–521.
- Kikegawa, Y., Genchi, Y., Kondo, H., Hanaki, K. (2006). Impacts of city-block-scale countermeasures against urban heat-island phenomena upon a buildings energy-consumption for air-conditioning. *Applied Energy*, 83, 649–668.
- Mahlia, T.M.I., Masjuki, H.H., Choudhury, I.A., Ghazali, N.N.N. (2002). Economical and environmental impact of room air conditioners energy labels in Malaysia. *Energy Conversion and Management*, 43, 2509–2520.
- Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., Pout, C. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40, 394–398.
- Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., Coronel, J.F., Maestre, I.R. (2011). A review of HVAC systems requirements in building energy regulations. *Energy and Buildings*, 43, 255–268.

- Rosas-Flores, J.A., Rosas-Flores, D., Morillón-Gálvez, D. (2011). Saturation, energy consumption, CO₂ emission and energy efficiency from urban and rural households appliances in Mexico. *Energy and Buildings*, 43, 10-18.
- Saidur, R. (2009). Energy consumption, energy savings, and emission analysis in Malaysian office buildings. *Energy Policy*, 37, 4104–4113.
- Sailor, D.J. (2001). Relating residential and commercial sector electricity loads to climate evaluating state level sensitivities and vulnerabilities. *Energy*, 26, 645–657.
- Sailor, D.J., Pavlova, A.A. (2003). Air conditioning market saturation and long-term response of residential cooling energy demand to climate change. *Energy*, 28, 941–951.
- Santillán-Soto, N., García-Cueto, R., Ojeda-Benítez, S., Velázquez-Limón, N., Quintero-Núñez, M., Schorr, M. (2013). Greenhouse gases mitigation against climate change: United States-Mexico border study case. *Atmósfera*, 26 (4), 499-507.
- Scott, M.J., Wrench, L.E., Hadley, D.L. (1994). Effects of climate change on commercial building energy demand. *Energy Sources*, 16, 317–32.
- Yik FWH, Burnett J, Prescott I. Predicting air-conditioning energy consumption of a group of buildings using different heat rejection methods. *Energy and Buildings*, 2001,33: 151-166.
- York Heating and Air conditioning (2009). Technical guide. <http://www.usair-eng.com/pdfs/251933-YTG-J-1009%28SunlineXP%29.pdf>