

Las energías renovables a escala urbana.

ASPECTOS DETERMINANTES Y SELECCIÓN TECNOLÓGICA¹

RENEWABLE ENERGY IN URBAN AREAS.

Critical aspects and
technological selection

ENERGIAS RENOVÁVEIS EM ESCALA URBANA.

Determinando aspectos
e seleção tecnológica

ENERGIE RENOUVELABLE À ÉCHELLE URBAINE.

Aspects critiques et
sélection technologique

Edgar Antonio Barragán-Escandón²

Doctor en Energías Renovables
Universidad Politécnica Salesiana
ebarragan@ups.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0003-2254-2524>

Esteban Felipe Zalamea-León³

Doctor en Arquitectura y Urbanismo
Universidad de Cuenca
esteban.zalamea@ucuenca.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-5551-5026>

Julio Terrados-Cepeda⁴

Doctor en Ingeniería Aeronáutica
Universidad de Jaén
jcepeda@ujaen.es
<https://orcid.org/0000-0003-1720-7545>

Alejandro Parra-González⁵

Ingeniero Civil e Ingeniero Ambiental
Universidad de Cuenca
alejandro.parra@ucuenca.edu.ec

Recibido: 16 de junio 2017

Aprobado: 21 de diciembre 2017

Cómo citar este artículo: BARRAGÁN-ESCAÑÓN, E. A., et al. (2019). "Las energías renovables a escala urbana. Aspectos determinantes y selección tecnológica". *Bitácora Urbano Territorial*, 29 (2): 39-48.
<https://doi.org/10.15446/bitacora.v29n2.65720>

- ¹ El artículo hace parte de la investigación en curso *El autoabastecimiento energético en los países en vías de desarrollo en el marco del metabolismo urbano: caso, Cuenca, Ecuador*.
- ² Ingeniero Eléctrico, Magíster en Energías Renovables, Magíster en Sistemas Eléctricos de Potencia y Doctor en Energías Renovables. Docente, investigador y consultor ambiental en el sector energético. Sus temas de interés son el desarrollo energético sostenible y las energías renovables.
- ³ Arquitecto y Magíster en Construcciones de la Universidad de Cuenca, Ecuador, y Doctor en Arquitectura y Urbanismo de la Universidad del Bio Bio, Chile. Becario Senescyt del Gobierno ecuatoriano. Director de dos proyectos de investigación en energías renovables en ciudad y autor de una decena de artículos científicos en revistas indexadas.
- ⁴ Doctor en Ingeniería Aeronáutica y profesor titular del Área de Proyectos de Ingeniería de la Universidad de Jaén. Pertenece al Grupo de Investigación IDEA, centrando sus investigaciones en la planificación energética y el aprovechamiento de los recursos renovables. Es autor de libros, capítulos de libros y artículos de revistas, y ha participado como ponente en numerosos congresos nacionales e internacionales. Ha participado en proyectos y contratos de investigación relacionados con el desarrollo de las energías renovables y la planificación energética, entre otras materias.
- ⁵ Ingeniero Civil e Ingeniero Ambiental, con cuatro maestrías en temas relacionados con sistemas de información geográfica y medio ambiente, y energías renovables. Actualmente es docente de la Universidad de Cuenca. Ha participado en grupos de investigación en ingeniería sísmica en Ecuador y España, coautor de artículos científicos y ponente en congresos internacionales.

Resumen

Tanto por deterioro ambiental como por efectos del calentamiento global, es necesario modificar el desarrollo urbano. Así, surge la necesidad de promover políticas públicas y una planificación organizada que incluya conceptos del aprovisionamiento energético con recursos urbanos internos para mitigar la presión que las ciudades infringen al ambiente. La tecnología actual posibilita que la ciudad cambie de modelo energético tradicionalmente basado en importar recursos externos, no obstante, es necesario revisar tecnologías que aprovechan los recursos urbanos para el autoaprovisionamiento. A través de encuestas a expertos internacionales y su discernimiento, se determinan las opciones tecnológicas que podrían modificar la matriz energética urbana, así como aspectos necesarios para su promoción. Se concluye que la energía solar, tanto fotovoltaica como solar térmica, despiertan, por ahora, el mayor interés entre las alternativas evaluadas, y que costos y regulaciones pueden ser aspectos determinantes para expandir su uso.

Palabras clave: energías renovables, sostenibilidad, autosuficiencia energética, planificación urbana.

Resumo

Expectativas contra a degradação ambiental, incluindo os efeitos do aquecimento global, o desenvolvimento urbano exigem mudanças. Assim, a necessidade de políticas públicas e planejamento organizado, que inclui conceitos relacionados ao fornecimento de energia com recursos urbanos internos surge. Dada a enorme pressão exercida pelas cidades sobre o meio ambiente, inclui propostas que promovam a sustentabilidade. A tecnologia atual permite que a cidade de mudar seu modelo de energia com base em recursos externos. Este trabalho apresenta um conjunto de tecnologias que aproveitam os seus próprios recursos para fornecimento de energia urbana. Em seguida, por meio de pesquisas de especialistas de vários países, opções tecnológicas que poderiam ter uma oportunidade para modificar a matriz energética urbana, bem como aspectos fundamentais para a promoção foi determinado. Conclui-se que tanto fotovoltaica e, a energia térmica solar desperta o maior interesse até agora nas alternativas avaliadas. Da mesma forma, os custos e os regulamentos podem ser a determinação de quando a expandir seus aspectos de uso.

Palavras-chave: energia renovável, sustentabilidade, auto-suficiência energética, planificação urbana.

Abstract

Environmental deterioration including the effects of global warming will require changes in the way in which the city is conceived. Thus, the need arises for public policy and planning to include the development of energy provided from cities own resources. Given the stresses that cities place on the environment, the proposed changes must be selected so as to promote sustainability. Current technology allows a city to modify how energy is provided in response to external sources. This article presents a set of technologies that could take advantage of urban resources for energy supply. Experts from several countries were surveyed to identify technologies that will have an impact on the urban energy matrix, and to identify morphological, social, and other key aspects of selection. Solar energy, both photovoltaic and thermal, were found to elicit the greatest interest among the technologies evaluated. Besides costs, politics and regulations were identified as possible determining factors when developing energy resources within cities.

Keywords: renewable energy, sustainability, energy self-sufficiency, urban planning.

Résumé

En raison de la dégradation de l'environnement et des effets du réchauffement de la planète, il est nécessaire de modifier le développement urbain. Il devient nécessaire de promouvoir des politiques publiques et une planification organisée intégrant les concepts d'approvisionnement en énergie utilisant des ressources urbaines internes, compte tenu de la pression que les villes exercent sur l'environnement. La technologie actuelle permet à la ville de modifier le modèle énergétique en fonction de ressources externes. Pour cela, il est nécessaire d'examiner les technologies qui exploitent les ressources urbaines pour l'auto-alimentation. Des enquêtes auprès d'experts internationaux, leur comparaison et leur discernement ont permis de déterminer les options technologiques susceptibles de modifier la matrice énergétique urbaine, ainsi que les aspects nécessaires à sa promotion. Il a été conclu que l'énergie solaire, tant photovoltaïque que solaire, suscitait pour l'instant le plus grand intérêt parmi les alternatives évaluées. Il a également été constaté que les coûts et la réglementation peuvent être des facteurs déterminants pour étendre son utilisation.

Mots clés: énergies renouvelables, durabilité, autosuffisance énergétique, urbanisme.

Introducción

Las ciudades son el resultado y la consecuencia del desarrollo energético. Actualmente, agrupan a más del 50% de la humanidad, concentran edificios, medios de transporte, procesos industriales y otras infraestructuras (Chen y Chen, 2015). Las áreas urbanas consumen más de dos tercios de la energía primaria, lo que ha propiciado una transformación profunda de su entorno mediato e inmediato, reflejándose en la pérdida de ecosistemas, remoción del suelo, transformación y contaminación de los cauces acuáticos (Pincetl, 2012), realidades que marcan un desequilibrio muy riesgoso en el planeta (Mejía-Rodríguez, Ávila-Ramírez y Córdova-Canela 2016).

El descubrimiento de nuevos campos petroleros y el aumento de la eficiencia en el uso de la energía han pospuesto la reforma necesaria a nivel global que limite el uso de recursos no renovables (Páez, 2010). La preparación frente a este requerimiento es crucial en el caso de las ciudades, puesto que deben enfrentarse a una nueva era energética enmarcada en la escasez, el encarecimiento de los recursos fósiles y las amenazas del calentamiento global (Páez, 2010). La incertidumbre frente al futuro no implica dejar de lado la formulación de políticas enmarcadas en la sostenibilidad (Dixon, et al., 2014). Las tendencias mundiales de urbanización requieren que los principios de sostenibilidad sean llevados a la práctica utilizando la tecnología disponible (Mejía-Rodríguez, Ávila-Ramírez y Córdova-Canela 2016; IEA 2016).

Las ciudades disponen de energía residual o recursos energéticos que podrían aprovecharse para modificar la matriz energética urbana (Ren, et al., 2010). Las energías renovables (ERs) distribuidas como la solar, la micro hidroeléctrica, la eólica o la geotermia son opciones para disminuir el consumo de energía proveniente de fuera de los límites urbanos. No obstante, existen barreras para alcanzar una participación significativa de estas alternativas. El reto a largo plazo es una reformulación política que permita modificar las fuentes energéticas, promoviendo un cambio en el consumidor, la dinámica del mercado o las posturas políticas (Grewal y Grewal, 2013). Las alternativas energéticas de autogeneración urbana, además, fomentan la industria y la mano de obra local, así como la democratización e independencia energética (IEA, 2016).

Los países y ciudades con dependencia de recursos externos se tornan vulnerables, puesto que tienen menos control sobre su economía y desarrollo (Grewal y Grewal, 2013). Páez (2010) analiza la situación de algunas ciudades en México y concluye que no están preparadas para afrontar la transición a fuentes alternativas de energía, estando a merced y riesgo de la reducción eventual de la disponibilidad del petróleo y la oscilación de los precios de los energéticos. Esta situación que se da, entre otros aspectos, por la carencia de leyes, políticas, programación y recurso humano capacitado, los cuales imposibilitan desarrollar una agenda energética post petróleo.

Cada ciudad debe analizar sus necesidades y los recursos que tiene disponibles, por ello se requieren estudiar las características locales para definir obstáculos y oportunidades particulares (Leduc y van Kann, 2013). Se debe garantizar la accesibilidad solar (Cárdenas y Uribe, 2012), la disponibilidad del viento, o prever sistemas de

recolección de desechos como basura o jardinería aprovechables energéticamente. A lo anterior se suma la gestión correcta de las demandas, el uso de tecnologías alternativas y eficientes o el incentivo del transporte eléctrico público como opciones para modificar la matriz energética urbana (IEA-ETSAP e IRENA, 2015).

En este contexto, el presente trabajo identifica aquellas tecnologías que podrían utilizarse para promover un nuevo modelo energético urbano menos dependiente de recursos externos y explora los aspectos claves para incentivar su uso de manera extendida.

La planificación energética urbana

La planificación urbana tradicional consiste en crear espacios estéticamente agradables antes que hacer ciudades ambientalmente amigables (Huang y Hsu, 2003). Las expectativas frente al deterioro ambiental, incluyendo los efectos futuros del calentamiento global, exigen que la forma como se concibe la ciudad sea modificada. En consecuencia, surge la necesidad de crear políticas públicas acordes y una planificación organizada que provoque cambios en el modelo energético urbano. De acuerdo con Zivkovic, et al. (2016), un modelo de sistema de energía urbana debe representar los procesos de adquisición y uso para satisfacer la demanda de un área urbana determinada. En este sentido, la planificación energética urbana tendría la misma finalidad que la planificación energética regional y, con ella, se buscaría identificar estrategias que viabilicen la puesta en práctica de un modelo urbano sostenible (IRENA, et al., 2016) que, a su vez, incentive el aprovechamiento de recursos locales. En definitiva, se propone la disminución de la importación de energía a la ciudad y, para lograrlo, es necesario implementar medidas de eficiencia energética, el uso intensivo de las ERs o el cambio de combustibles. Las alternativas, sin embargo, requieren desarrollarse en forma conjunta con políticas de escala regional o nacional.

El uso intensivo de los recursos fósiles, las limitaciones tecnológicas, las políticas locales, así como la aceptación ciudadana son impedimentos para la masificación de las tecnologías renovables. Sin embargo, la degradación paulatina del ambiente y la reducción de los recursos condicionan a que el desarrollo local mantenga el modelo energético actual basado únicamente en la importación de energía.

El uso de las energías renovables en ciudades

Varios autores plantean que las ciudades deben diseñarse de forma que promuevan un metabolismo circular (Agudelo-Vera, et al., 2012; Haughton, 1997; Leduc y van Kann, 2013). Para ello, son necesarias estrategias a largo plazo que apunten a un modelo energético sostenible, basado en los recursos locales y en una dependencia externa menor (IRENA, et al., 2016). La investigación de Barragán, Terrados-Cepeda y Zalamea-León (2017) identifica once subsistemas con diversos grados de madurez capaces de sustituir a los combustibles, a la electricidad o a la provisión de calor, y que pueden ser aplicadas internamente en las ciudades. De igual manera, presenta algunos ejemplos de posibilidades tecnológicas en varias ciudades del mundo. En la Tabla 1 se muestran estas tecnologías, así como ciudades referentes en donde se han determinado diversas potencialidades y fuentes alternativas.

Tabla 1. Energías renovables que pueden aplicarse en la ciudad

Subsistema	Energía	% de demanda	Ciudad
Biocarburos	Combustible	93%	Tartu (Estonia)
Biomasa	Eléctrica Térmica	80%	Beijing (China)
Biogás (biodigestores)	Combustible	54,5%	Tartu (Estonia)
Biogás (rellenos sanitarios)	Eléctrico	6, 40%	Mexicali, Tijuana (México)
Incineración	Eléctrica Térmica	12%	Estocolmo (Suecia)
Mareomotriz	Eléctrica	---	San Luis (Brasil)
Pequeña eólica	Eléctrica	43%	Wageningen (Países Bajos)
Geotermia	Térmica	68.69%	Ludwigsburg (Alemania)
Pequeña hidroeléctrica	Eléctrica	100%	Beppú (Japón)
Solar fotovoltaica	Eléctrica	45%	Ostfildern (Alemania)
Solar térmica	Térmica	75%	Concepción (Chile)

Fuente: Barragán, Terrados-Cepeda y Zalamea-León (2017: 9-11).

La propuesta de Barragán, Terrados-Cepeda y Zalamea-León (2017) refleja que la autogeneración urbana tiene limitaciones dependiendo de la disponibilidad de los recursos, de la capacidad de inserción del equipamiento requerido, así como de la correlación temporal entre la demanda y la disponibilidad del recurso renovable. El aprovechamiento máximo de la energía está condicionado a la eficiencia de la tecnología, la tipología de la urbe o a los patrones de demanda, al suministro y, fundamentalmente, a los sistemas de almacenamiento.

Bioetanol

El bioetanol puede obtenerse a partir de diferentes materias primas como madera, pasto, residuos de cultivos, residuos de papel o de materiales lignocelulósicos. Si proviene de residuos urbanos lignocelulosos tiene un valor añadido, ya que se aprovechan desechos que, en principio, se consideran como desperdicios, que pueden ser contaminantes, o que requieren gestión o energía para su procesamiento (Martínez, Montoya y Sierra, 2014). La disponibilidad de la materia prima no debe entrar en conflicto con los espacios recreativos o de áreas verdes urbanas, entendiendo que no debe degradarse la vegetación, sino hacer uso de los residuos (Kraxner, et al., 2016).

Biomasa

La biomasa se puede convertir mediante procesos químicos y bioquímicos en energía secundaria disponible como electricidad, calor o combustible (Roberts, et al., 2015). En este caso, se consideran como materia prima los desechos de poda de jardines urbanos y/o domésticos. La bioenergía puede ser atractiva como

medio de provisión energética, principalmente, en países en vías de desarrollo, en donde la demanda es baja en comparación con los países desarrollados.

Biogás

Hay varias fuentes de biogás en la ciudad. Este energético puede servir para abastecer la demanda de energía térmica o de electricidad, o utilizarse como combustible para el transporte. Se identifican tres fuentes de biogás: rellenos sanitarios (Xydis, Nanaki y Koroneos, 2013), aguas residuales (Shen, et al., 2015), y la digestión anaerobia de podas o residuos vegetales urbanos (de Souza, et al., 2014).

Incineración

La incineración es utilizada con desechos no biodegradables y con contenido de humedad. Se reduce entre un 80% y un 90% del volumen de los desechos con este proceso (de Souza, et al., 2014), minimizándose la necesidad de vertederos. Zubizarreta, et al. (2010), estiman que con la incineración se obtiene más de 3,7 veces de energía que con el biogás de los rellenos sanitarios. Sin embargo, su aplicación está limitada por costos, legislación local (de Souza, et al., 2014) y controles para evitar emisiones tóxicas.

Energía mareomotriz

La energía del mar puede utilizarse desde diferentes tecnologías: mareomotriz, corrientes, mareomotérmica, olas o potencia osmótica (IDAE, 2011). Entre estas, la mareomotriz tiene un mayor grado de madurez y de posibilidades para ser usada a escala comercial. Requiere un reservorio, que puede ser una bahía y un estuario, lo

cual es un limitante, pues el espacio no está siempre disponible. A ello se suman restricciones por el impacto ambiental, el alto costo y los tiempos de construcción (Xu, Ni y Zheng, 2015).

Energía eólica

En este caso, la configuración urbana toma un papel importante, ya que provoca turbulencias y perturba la velocidad del viento. Las instalaciones eólicas tienen una serie de ventajas como el empoderamiento del usuario, una mayor eficiencia global, evita pérdidas en las redes por la proximidad a la carga y se prescinde del emplazamiento de infraestructuras eléctricas externas (IDAE, 2011). Pero, aspectos como la seguridad, las sombras, el ruido, las vibraciones o el impacto visual limitan su integración arquitectónica y estructural en las edificaciones (Ishugah, et al., 2014).

Geotermia

La energía geotérmica superficial se emplea para el calentamiento de agua, aplicaciones de climatización o refrigeración de edificios, y con relativa independencia de condiciones climáticas externas, es decir, que provee energía de manera estable a lo largo de todo el año (Schiel, et al., 2016). A diferencia de las instalaciones geotérmicas utilizadas para la generación de electricidad, las aplicaciones en ciudades se consideran de baja temperatura y pueden servir en proyectos urbanos e industriales (IDAE, 2011). Este tipo de tecnología utiliza el principio de la bomba de calor, que permite transferir el calor de un espacio frío a otro más caliente. En zonas con un diferencial térmico anual elevado entre estaciones (calefacción en invierno y refrigeración en verano) esta opción es de gran utilidad, pero el potencial se reduce en zonas con variaciones térmicas ambientales menores.

Energía hidroeléctrica

Las centrales hidroeléctricas tienen diferentes escalas y rangos de potencia. Las centrales a pie de presa o las que aprovechan el desnivel del agua de los canales de riego no superan los 5 MW de capacidad (IDAE, 2011). La potencia incide en el tamaño de la infraestructura y en los impactos ambientales ocasionados. El tamaño de la instalación en ambientes urbanos depende de la existencia del recurso o de la disponibilidad de un área adecuada para su instalación, por ejemplo, Moscovici, et al. (2015) proponen centrales que superan los 1000 kW en Filadelfia (Estados Unidos), mientras que Fujii, et al. (2015) destacan el uso de centrales menores en Beppu (Japón). Las redes de aprovisionamiento urbano de agua pueden aprovecharse para centrales hidroeléctricas pequeñas, disminuyendo hasta un 50% el costo de la infraestructura civil e incrementando el tiempo de operación comparado con instalaciones ubicadas a pie de río (Kucukali, 2010).

Solar térmico

Esta tecnología es utilizada en diferentes localidades con diferentes grados de masificación. El uso más habitual es para producir agua caliente de uso residencial e industria, o para climatización (calor o frío). En algunas zonas de China, el 94% de las viviendas utilizan dicha tecnología (Han, Mol y Lu, 2010). En México, al contrario, la falta de promoción, regulaciones o incentivo hace que el uso de esa

tecnología no se masifique, pese a que puede reducir el consumo de 51% de gas licuado de petróleo (Rosas-Flores, Rosas-Flores y Fernández Zayas, 2016). Al igual que la captación fotovoltaica, en la energía solar térmica el espacio en los techos y la orientación son limitantes para su operación.

Energía solar fotovoltaica

La implementación de paneles fotovoltaicos en entornos urbanos depende de varios factores: recurso, capital, soporte tecnológico, aceptabilidad social, soporte institucional, obstáculos que causan sombras o restricciones arquitectónicas. La disponibilidad de espacio en los tejados es un factor crucial para este tipo de aplicaciones. Dadas las condiciones técnicas, políticas y sociales para el uso de estos espacios, se podría visualizar a la ciudad como una planta de energía fotovoltaica distribuida (Byrne, et al., 2015). Proyectos como el *Project Sunroof*⁶ son ejemplos del gran interés para los investigadores por promover el uso de esta tecnología en las áreas urbanas.

Metodología

Incidencia futura de las tecnologías, y claves para su promoción y desarrollo

Para determinar cuáles tecnologías pueden aprovecharse con recursos urbanos propios, se planteó una encuesta a 175 profesionales de diferentes países utilizando formularios de Google. Se recibieron 79 encuestas diligenciadas y se validaron 74. Se seleccionó a los participantes a través de acercamientos personales, recomendaciones profesionales y análisis de la información de su currículum en internet. El 53% de los participantes pertenecen al sector académico, 28% al sector público, 11% al sector privado y el resto a otras instituciones. El 33% de los participantes proceden de España, el 27% de Ecuador y el 40% de otros países (Alemania, Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Colombia, Cuba, Estados Unidos, Guatemala, Honduras, Paraguay, Portugal y Uruguay).

El formulario incluía una breve descripción del estudio y varias preguntas. Para valorar las respuestas se utilizó la escala de Lickert (1-5). Para medir la fiabilidad de los resultados se usó el coeficiente de Cronbach (α), el cual evalúa el grado de homogeneidad interna entre las variables que conforman la escala a partir de la correlación entre ellas. Mientras más se acerca a 1 se considera más adecuado. Entre 0,8 y 0,9 es bueno. Entre 0,7 y 0,8 es aceptable. Entre 0,6 y 0,7 es cuestionable.

La primera pregunta buscaba indagar por la percepción que tenían los profesionales frente a la incidencia de las tecnologías especificadas en la Tabla 1. En este caso, la homogeneidad depende de la experticia de los consultados y del entorno evaluado. Para determinar el impacto de cada tecnología, se calculó el promedio de cada respuesta (Eleftheriadis y Anagnostopoulou, 2015; Zhang, Shen y Chan, 2012).

⁶ Para mayor información véase <https://www.google.com/get/sunroof#p=0>

La valoración de las respuestas se puede realizar en función de la procedencia de los encuestados o su actividad profesional. Puesto que se quiere comparar en función de la homogeneidad de las respuestas, se planteó el análisis bajo tres enfoques:

- E1: todos los participantes $a=0,59$
- E2: participantes académicos $a=0,675$
- E3: participantes académicos españoles $a=0,764$

La encuesta también indagó por los aspectos clave para promover un modelo energético urbano que incluya las energías renovables. Se les solicitó a los participantes elegir entre los siguientes factores:

- Interés de las autoridades.
- Costos.
- Leyes y regulaciones.
- Estructura gubernamental.
- Madurez tecnológica.
- Disminución de recursos fósiles.
- Interés de la ciudadanía.
- Conocimiento local.
- Calentamiento global.
- Integración arquitectónica.
- Bajo los tres enfoques definidos se tiene:
- E1: todos los participantes $a=0,71$
- E2: participantes académicos $a=0,72$
- E3: participantes académicos españoles $a=0,72$

Resultados

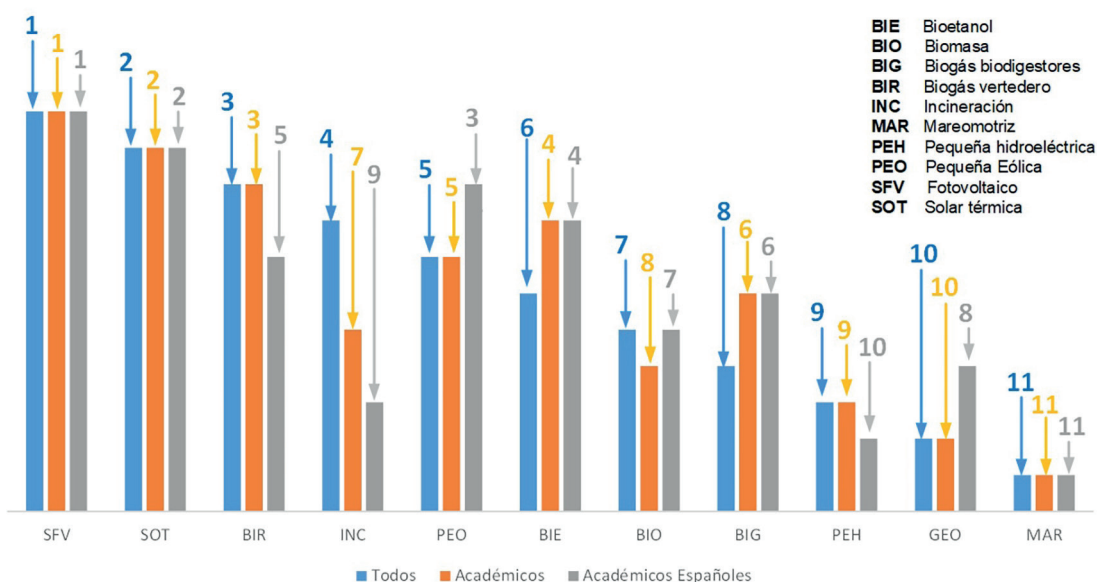
Evaluación en un entorno genérico

En la Gráfica 1 se presentan los resultados de las respuestas. Se muestra la posición obtenida de cada tecnología para los tres enfoques (1 a 11). Por ejemplo, la incineración tiene la posición cuarta, séptima y novena bajo los enfoques E1, E2 y E3 respectivamente. En el enfoque E1, el a indica que no hay un consenso sobre el tipo de tecnología. Bajo el enfoque E2 el a mejora, sin embargo, es cuestionable. Mientras en E3 el coeficiente es aceptable.

La encuesta no está dirigida a una ciudad específica y, dado que estas son diversas en tamaño, población, demandas, características arquitectónicas y urbanas y, sobre todo, recursos, los resultados difieren. En E2, aunque los participantes son expertos, la fiabilidad no es aceptable por la diversidad de entornos de aplicación de las tecnologías. Al consultar únicamente a los académicos españoles el entorno se hace más específico, por lo que hay una mayor correlación.

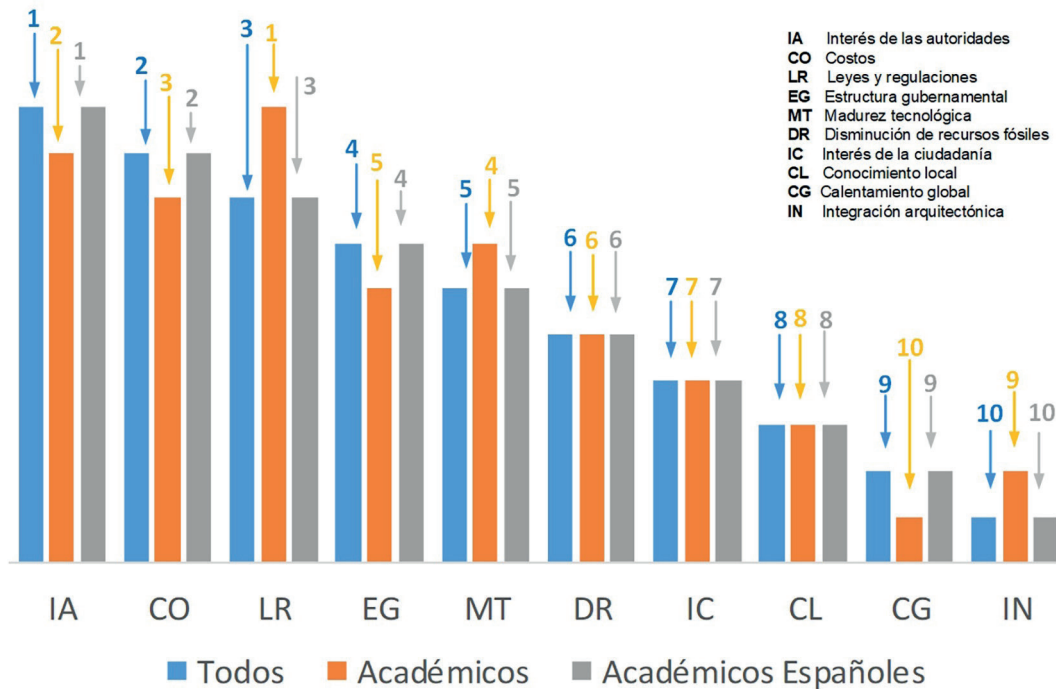
Los resultados señalan que en los tres enfoques la energía solar fotovoltaica y solar térmica tendrá más incidencia y aptitud en la escala urbana (posición 1 y 2 respectivamente), mientras que la energía mareomotriz es la menos apta (posición 11). Con respecto a las respuestas de la segunda pregunta, la homogeneidad es aceptable, siendo el interés de las autoridades, los costos, y las leyes

Gráfica 1. Impacto de las tecnologías en el futuro



Fuente: elaboración propia.

Gráfica 2. Factores clave para la promoción de las energías renovables en la ciudad



Fuente: elaboración propia.

y regulaciones los aspectos que podrían ser cruciales para la promoción de las energías renovables en la ciudad (ver Gráfica 2). Por otro lado, el calentamiento global, la disminución de los recursos fósiles y la integración arquitectónica se encuentran posicionados al final, por lo tanto, son los menos relevantes.

Evaluación en un entorno específico

La encuesta se aplicó en la ciudad de Cuenca, ubicada al sur de Ecuador. En la zona urbana viven alrededor de 330.000 personas y, por lo tanto, se define como una ciudad intermedia. Se trata de una ciudad dispersa en cuanto a su densidad habitacional (Cabrerá, et al., 2015). El mayor consumidor de energía es el sector del transporte, con un 63% del consumo total, seguido por la industria con un 21%, el sector residencial con un 14% y el comercial con un 2%. Las fuentes principales de energía son los combustibles fósiles (gasolina: 35%, diésel: 32%, GLP: 14%, fuel oil: 6% y GN: 3%), mientras que la energía eléctrica sólo aporta el 10%, conservando la tendencia de consumo a nivel nacional (Jaramillo, 2017).

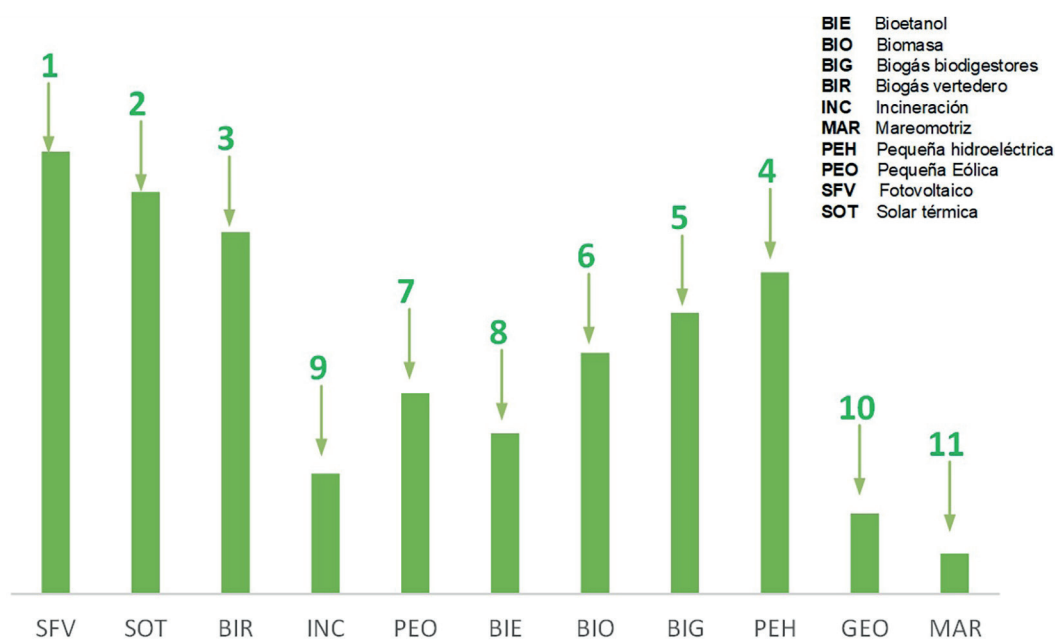
La ciudad cuenta con diferentes fuentes que podrían ser aprovechadas para la generación de energía. Tiene una radiación solar media anual de 1615 kWh/m² (NREL, 2017) y es atravesada por cuatro ríos, en los cuáles se podrían instalar centrales hidroeléct-

tricas pequeñas. Actualmente se encuentra en operación una central de 1 MW que utiliza el biogás del relleno sanitario de la ciudad, el cual abastecerá entre el 1% y el 2% de la demanda de energía eléctrica de la zona urbana de Cuenca (Barragán, Arias y Terrados, 2016).

Al evaluar las respuestas de los encuestados (ver Gráfica 3), el alfa de Cronbach indica homogeneidad ($\alpha=0,765$). La energía solar fotovoltaica y la solar térmica siguen siendo las preferidas de los encuestados, la primera, para producción de energía eléctrica y, la segunda, para provisión de agua caliente. Luego le siguen el biogás de rellenos sanitarios y las pequeñas hidroeléctricas. Es destacable que los resultados coinciden con los recursos disponibles en la ciudad, así como con proyectos que están en marcha.

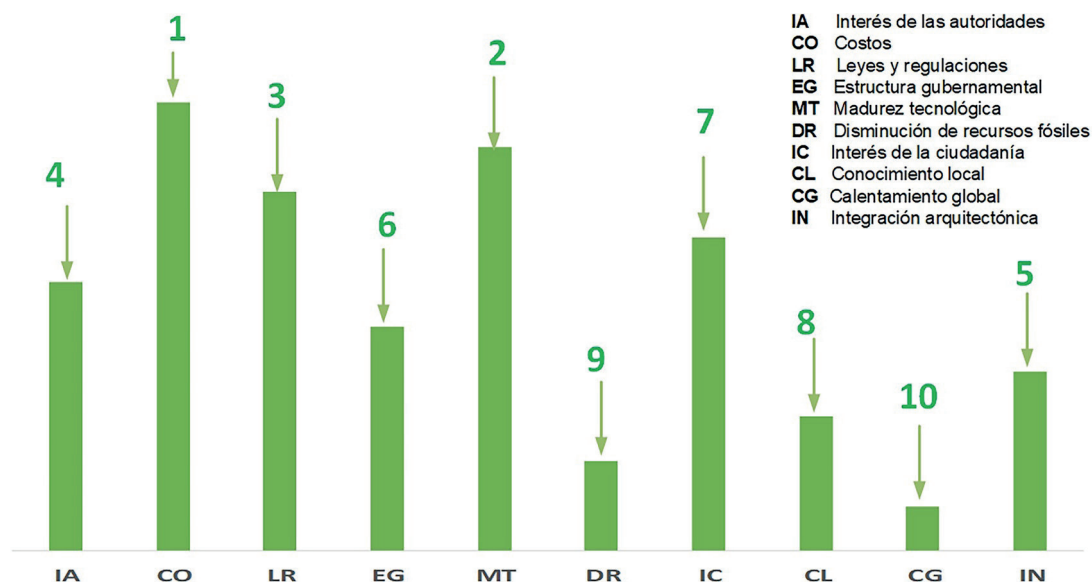
Al evaluar los factores que influirían en la promoción de las tecnologías (la homogeneidad de las respuestas es aceptable, con un $\alpha=0,768$), se advierte que los encuestados consideran los costos como el factor más influyente, seguido de la madurez de la tecnología y la existencia de leyes y regulaciones (ver Gráfica 4). Este posicionamiento varía con respecto a los resultados indicados en la Gráfica 2, sin embargo, factores como el calentamiento global y el conocimiento local se encuentran en el límite inferior de la jerarquización, además de la disminución de los recursos fósiles.

Gráfica 3. Impacto de las tecnologías en la ciudad de Cuenca



Fuente: elaboración propia.

Gráfica 4. Factores clave para la implantación de las energías renovables en la ciudad de Cuenca



Fuente: elaboración propia.

Discusión y conclusiones

Las ciudades son sistemas complejos que dependen de la provisión de materiales, energía, agua y nutrientes que provienen del entorno natural exterior (Kennedy, Cuddihy y Engel-Yan, 2007). En el caso de la energía, el desarrollo tecnológico permite que se utilicen recursos internos propios de la urbe a modo de auto aprovisionamiento. La nueva agenda urbana definida en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre la Vivienda y el Desarrollo Urbano Sostenible Hábitat III (ONU, 2016) y los organismos internacionales (IEA, 2016; IRENA, 2016) buscan alcanzar ciudades menos dependientes de los recursos exógenos y resilientes a los efectos del cambio climático. La urbanización global creciente requerirá una provisión energética constante (Huang y Chen, 2005; Leduc y Rovers, 2008). Sin embargo, tal como está desarrollado el sistema energético mundial, se prevé que esta situación sea insostenible a mediano plazo (Barles, 2009; Haberl, et al., 2004; Huang y Chen, 2005). Se hace necesario que la planificación urbana incluya medidas que propendan por el uso de tecnologías que permitan producir energía con recursos que se disponen en la ciudad y se integren a la morfología urbana (Barragán, et al., 2018; Páez, 2010; Kennedy, Cuddihy y Engel-Yan, 2007). En conjunto con otras innovaciones que promueven la eficiencia energética, el uso de las tecnologías de la información y de la comunicación, las construcciones o la movilidad sostenible, la aplicación de las energías renovables dentro de los límites urbanos es un reto.

Bajo esta perspectiva y a partir de la consulta a expertos, el presente documento exploró cuáles tipos de ERs podrían ser más adecuadas para promover su aplicación en la ciudad. Se advierte que no hay soluciones únicas y, más bien, sugiere adelantar un análisis individual a nivel de cada ciudad (Barragán, et al., 2018). No obstante, los consultados consideran que la aplicación de los sistemas de captación solar tendrá un impacto en la matriz energética urbana. Esta conclusión está alineada con la investigación de Páez (2010), la misma que considera que es necesario que las ciudades inicien una transición pos petróleo o tecno-solar.

Los costos y la existencia de legislación son factores influyentes en todos los casos analizados. Esto indica que mientras dichas tecnologías no sean competitivas con las tradicionales, su promoción se dificultará. Por otro lado, se requiere que las redes o sistemas de distribución se legislen, normen y adapten técnicamente a un sistema urbano que, además de requerir energía, tenga la posibilidad de producirla. En ese mismo sentido, la existencia de leyes y regulaciones permitirá la adopción de una u otra tecnología, no solo en lo referente a la existencia de incentivos, sino a una normativa técnica específica.

En general, de los factores analizados, el calentamiento global y el conocimiento local son temas que se consideran menos influyentes. Esto evidencia que no hay empatía sobre los impactos globales que provocan la producción o transmisión de la energía. Así mismo, la promoción creciente de estas tecnologías y la existencia de capacidades locales ha hecho que el conocimiento sea uno de los factores menos limitantes.

En el caso específico analizado, el desconocimiento sobre el potencial de la microgeneración renovable, así como el escepticismo a nivel gubernamental son, sin duda, una barrera para su promoción local. No obstante, es posible dar pautas sobre cuáles tecnologías son viables a mediano y largo plazo a través de experiencias foráneas.

Para confirmar los resultados, se podría aplicar la encuesta en diferentes ciudades, esto permitiría determinar con mayor certeza las tecnologías que tendrían más impacto en el futuro a escala urbana y/o por casos puntuales. La experticia y formación previa de los participantes también debe ser evaluada previamente, ya que es un factor determinante en los resultados.

Los resultados de esta investigación son exploratorios, pues las ciudades no son homogéneas, por lo que extender el análisis a más ciudades y regiones puede facilitar la comparación entre distintos entornos. Complementariamente, se podría tener una mejor aproximación utilizando técnicas multicriterio que evalúen aspectos económicos, técnicos, sociales o ambientales desde una perspectiva holística. 

Bibliografía

- AGUDELO-VERA, C. M., et al. (2012). "Harvesting urban resources towards more resilient cities". *Resources, Conservation and Recycling*, 64: 3-12.
- BARLES, S. (2009). "Urban metabolism of Paris and its region". *Journal of Industrial Ecology*, 13 (6): 898-913.
- BARRAGÁN, A., ARIAS, P. D. y TERRADOS, J. (2016). "Fomento del metabolismo energético circular mediante generación eléctrica proveniente de rellenos sanitarios: estudio de caso, Cuenca, Ecuador. Promoting circular energy metabolisms through electricity generation from landfills: case study". *Ingenius*, 16: 36-42.
- BARRAGÁN, A., et al. (2018). "Electricity production using renewable resources in urban centres". *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 171 (1): 12-25.
- BARRAGÁN, A., TERRADOS-CEPEDA, J. y ZALAMEA-LEÓN, E. (2017). "The role of renewable energy in the promotion of circular urban metabolism". *Sustainability*, 9 (12): 2341. Consultado en: <http://www.mdpi.com/2071-1050/9/12/2341>
- BYRNE, J, et al. (2015). "A solar city strategy applied to six municipalities: integrating market, finance, and policy factors for infrastructure-scale photovoltaic development in Amsterdam, London, Munich, New York, Seoul, and Tokyo". *Energy and Environment*, 5: 68-88.
- CABRERA, N., et al. (2015). "Evaluando la sustentabilidad de la densificación urbana. Indicadores para el caso de cuenca (Ecuador)". *Bitácora Urbano Territorial*, 25 (2): 21-34. Consultado en: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/bitacora/article/view/49014>

- CÁRDENAS, L. y URIBE, P. (2012). "Acceso solar a las edificaciones: el eslabón pendiente en la norma urbanística chilena sobre la actividad proyectual". *Revista de Urbanismo*, 26: 21-42.
- CHEN, SH. y CHEN, B. (2015). "Urban energy consumption: different insights from energy flow analysis, input-output analysis and ecological network analysis". *Applied Energy*, 138: 99-107.
- DE SOUZA, S. N., et al. (2014). "Technical potential of electricity production from municipal solid waste disposed in the biggest cities in Brazil: landfill gas, biogas and thermal treatment". *Waste Management & Research*, 32 (10): 1015-1023.
- DIXON, T., et al. (2014). "Urban retrofitting: identifying disruptive and sustaining technologies using performative and foresight techniques". *Technological Forecasting and Social Change*, 89: 131-144.
- ELEFThERiADIS, I. M. y ANAGNOSTOPOULOU, E. G. (2015). "Identifying barriers in the diffusion of renewable energy sources". *Energy Policy*, 80: 153-164.
- FUJIIA, M., et al. (2015). "Assessment of the potential for developing mini/micro hydropower: a case study in Beppu City, Japan". *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 11: 107-116.
- GREWAL, P. S. y GREWAL, P. S. (2013). "can cities become self-reliant in energy? a technological scenario analysis for Cleveland, Ohio". *Cities*, 31: 404-411.
- HABERL, H., et al. (2004). "Progress towards Sustainability? What the conceptual framework of material and energy flow accounting (MEFA) can offer". *Land Use Policy*, 21 (3): 199-213.
- HAN, J., MOL, A. P. J. y LU, Y. (2010). "Solar water heaters in China: a new day dawning". *Energy Policy*, 38: 383-391.
- HAUGHTON, G. (1997). "Developing sustainable urban development models". *Cities*, 14 (4): 189-195.
- HUANG, Sh. L. y CHEN, Ch. W. (2005). "Theory of urban energetics and mechanisms of urban development". *Ecological Modelling*, 189 (1-2): 49-71.
- HUANG, Sh. L. y HSU, W. L. (2003). "Materials flow analysis and energy evaluation of Taipei's urban construction". *Landscape and Urban Planning*, 63 (2): 61-74.
- IDAE. (2011). *Plan de Energías Renovables 2011-2020*. Madrid: IDAE. Consultado en: <http://www.idae.es/index.php/id.670/mod.pags/mem.detalle>
- IEA. (2016). *Energy technology perspectives 2016. Towards sustainable urban energy systems*. Paris: International Energy Agency. Consultado en: https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/EnergyTechnologyPerspectives2016_Executive-Summary_EnglishVersion.pdf
- IEA-ETSP e IRENA. (2015). *Solar Heating and Cooling for Residential Applications. Technology Brief*. Consultado en: http://www.irena.org/documentdownloads/publications/irena_etsap_tech_brief_r12_solar_thermal_residential_2015.pdf
- IRENA, et al. (2016). *Habitat III High-Level Forum on Renewable Energy in Urban Settings*. Consultado en: http://habitat3.org/wp-content/uploads/RE-Energising-Cities_Outcomedoc_26Oct2016.pdf
- IRENA. (2016). *Renewable energy in cities*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency. Consultado en: http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_Renewable_Energy_in_Cities_2016.pdf
- ISHUGAH, T. F., et al. (2014). "Advances in wind energy resource exploitation in urban environment: a review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37: 613-626.
- JARAMILLO, C. E. (2017). *Estudio de metabolismo urbano en la ciudad de Cuenca*. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana.
- KENNEDY, CH., CUDDIHY, J. y ENGEL-YAN, J. (2007). "The changing metabolism of cities". *Journal of Industrial Ecology*, 11 (2): 43-59.
- KRAXNER, F., et al. (2016). "Bioenergy and the city – what can urban forests contribute?". *Applied Energy*, 165: 990-1003.
- KUCUKALI, S. (2010). "Municipal water supply dams as a source of small hydropower in Turkey". *Renewable Energy*, 35 (9): 2001-2007.
- LEDUC, W. R. W. A. y ROVERS, R. (2008). "Urban tissue: the representation of the urban energy potential". Dublin, ponencia presentada en 25th International Conference on Passive and Low Energy Architecture: Towards Zero Energy Building, PLEA.
- LEDUC, W. R. W. A. y VAN KANN, F. M. G. (2013). "Spatial planning based on urban energy harvesting toward productive urban regions". *Journal of Cleaner Production*, 39: 180-190.
- MARTÍNEZ, J. A., MONTOYA, N. y SIERRA, A. M. (2014). "Energía del futuro: bioalcoholes a partir de residuos sólidos urbanos (RSU)". *Revista Escuela de Administración de Negocios*, 77: 64-81. Consultado en: <http://www.scielo.org.co/pdf/ean/n77/n77a03.pdf>
- MEJÍA-RODRÍGUEZ, J. A., ÁVILA-RAMÍREZ, D. C. y CORDOVA-CANELA, F. (2016). "Las innovaciones tecnológicas orientadas al autoabastecimiento energético sostenible. El caso de México". *Bitácora Urbano Territorial*, 26 (1): 93-102. Consultado en: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/bitacora/article/view/43547>
- MOSCOVICI, D., et al. (2015). "Can sustainability plans make sustainable cities? the ecological footprint implications of renewable energy within Philadelphia's Greenworks Sustainability". *Science, Practice & Policy*, 11 (1): 32-43.
- NREL. (2017). System Advisor Model (SAM). Consultado en: <https://sam.nrel.gov/>
- ONU. (2016). *Proyecto de documento final de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre la Vivienda y el Desarrollo Urbano Sostenible (Hábitat III)*. Quito: Naciones Unidas. Consultado en: <http://habitat3.org/wp-content/uploads/Draft-Outcome-Document-of-Habitat-III-S.pdf>
- PÁEZ, A. (2010). "Energy-urban transition: the Mexican case". *Energy Policy*, 38 (11): 7226-7234.
- PINCETL, S. (2012). "Nature, urban development and sustainability – what new elements are needed for a more comprehensive understanding?". *Cities*, 29 (2): 32-37.
- REN, H., et al. (2010). "Feasibility assessment of introducing distributed energy resources in urban areas of China". *Applied Thermal Engineering*, 30 (16): 2584-2593.
- ROBERTS, J. J., et al. (2015). "Assessment of dry residual biomass potential for use as alternative energy source in the party of General Pueyrredón, Argentina". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41: 568-583.
- ROSAS-FLORES, J. A., ROSAS-FLORES, D. y FERNÁNDEZ ZAYAS, J. L. (2016). "Potential energy saving in urban and rural households of Mexico by use of solar water heaters, using geographical information system". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53: 243-252.
- SCHIEL, K., et al. (2016). "GIS-based modelling of shallow geothermal energy potential for CO2 emission mitigation in urban areas". *Renewable Energy*, 86: 1023-1036.
- SHEN, Y., et al. (2015). "An overview of biogas production and utilization at full-scale wastewater treatment plants (WWTPs) in the United States: challenges and opportunities towards energy-neutral WWTPs". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50: 346-362.
- XU, J., NI, T. y ZHENG, B. (2015). "Hydropower development trends from a technological paradigm perspective". *Energy Conversion and Management*, 90: 195-206.
- XYDIS, G., NANAKI, E. y KORONEOS, C. (2013). "Exergy analysis of biogas production from a municipal solid waste landfill". *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 4: 20-28.
- ZHANG, X., SHEN, L. y CHAN, S. Y. (2012). "The diffusion of solar energy use in HK: what are the barriers?". *Energy Policy*, 41: 241-249.
- ZIVKOVIC, M., et al. (2016). "Exploring scenarios for more sustainable heating: the case of Niš, Serbia". *Energy*, 115, (2): 1758-1770.
- ZUBIZARRETA, J., et al. (2010). "Potential and cost of electricity generation from human and animal waste in Spain". *Renewable Energy*, 35 (2): 498-505.