

HERRAMIENTAS DE EVALUACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO Y OPTIMIZACIÓN SOLAR EN EL PLANEAMIENTO DE LAS ÁREAS URBANAS

Nersa Gómez

Instituto de Investigaciones, Facultad de Arquitectura y Diseño de La Universidad del Zulia, (IFADLUZ).
nersagster@gmail.com

Ester Higuera

Departamento de Urbanística y Ordenación del Territorio, Escuela de Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid (UPM).
ester.higuera@upm.es

Mercedes Ferrer y Arroyo

Instituto de Investigaciones, Facultad de Arquitectura y Diseño de La Universidad del Zulia, (IFADLUZ).
ferrer.mercedes@gmail.com

RESUMEN

En la actualidad las ciudades y sus edificaciones requieren grandes cantidades de energía para funcionar correctamente, los habitantes de la ciudad consumen más del 75% de los recursos totales de energía como resultado de las actividades realizadas en el medio ambiente urbano, el consumo de energía se concentra cada vez más en las zonas urbanas que actualmente albergan casi el 80% de la población. Es por ello que fomentar el aprovechamiento extensivo de la radiación solar en ciudades se presenta como una estrategia viable y oportuna para un desarrollo sustentable, lo que puede constituir un aporte significativo para la reducción del consumo de las fuentes energéticas fósiles y disminución de las emisiones contaminantes. Por ello la cuantificación de la radiación solar adquiere gran importancia para el aprovechamiento de energía. El reto es disponer de valores para fomentar la utilización extensiva de radiación solar en diversas escalas de planeamiento y determinar los procedimientos para garantizar diversas fuentes de energía que influyan en el concepto de producción y consumo de energía local, y nuevos sistemas de almacenamiento energético. El trabajo presenta los avances de una investigación sobre métodos y herramientas de planificación solar a nivel internacional, a fin de comparar las técnicas utilizadas para seleccionar la herramienta adecuada de análisis del potencial solar en la planificación urbana. El método comprende: Fase 1: revisión de literatura sobre captación de energía y aprovechamiento solar; Fase 2: descripción, análisis y comparación de herramientas de planificación solar; selección de herramienta. Los resultados comparativos de los procedimientos utilizados, indicadores y/o herramientas destacan a Ecotect como la plataforma apropiada por su capacidad de adaptación al microclima local, sus instrumentos de análisis y adaptabilidad, lo que facilita la integración de los aspectos solares y favorece el uso de tecnología solar a partir de los recursos locales disponibles.

Palabras clave: Planificación urbana, evaluación del potencial solar, optimización y aprovechamiento de energía, tecnología solar.

INTRODUCCIÓN

El microclima urbano juega un rol importante en el consumo energético de los edificios y el aprovechamiento de la energía en los espacios exteriores. La necesidad de aumentar la eficiencia energética, reducir las emisiones de los contaminantes y atenuar la evidente falta de sostenibilidad que afecta a las ciudades, ha dirigido la atención al planeamiento solar como referente para proponer cambios en el diseño urbano con fines de optimización y aprovechamiento de la energía solar. Actualmente las investigaciones sobre eficiencia energética se concentran básicamente en cómo orientar el diseño en los nuevos desarrollos. Se considera que los principales problemas de la insostenibilidad son resultado del modelo urbano, caracterizado en las últimas décadas por un elevado consumo de energía en las zonas urbanas.

El consumo de energía se concentra cada vez más en las ciudades: estas son, hoy en día, el hogar de casi el 80% de la población y suponen el 75% de la demanda de energía total y de emisiones de CO₂. Actualmente, sabemos también que estamos cerca del final de la era de la energía barata (fósil) y que debemos hacer de la reducción de la demanda de energía una prioridad. El abastecimiento de energía del futuro no se realizará desde grandes plantas energéticas, sino desde multitud de plantas pequeñas y descentralizadas, alimentadas cada vez con más fuentes de energía renovable (Caamaño et al., 2011).

De ahí que, además de trabajar intensamente en el ahorro de energía y ser más eficientes energéticamente, nos enfrentamos al reto de asumir el potencial de las diversas fuentes de energía disponibles a nivel local y de implementar políticas para aprovecharlas. La producción de energía a nivel local no es solo una estrategia para garantizar el suministro energético, sino también influir en el concepto mismo de producción y consumo, en la reducción de pérdidas en la red de distribución de energía y en nuevos sistemas de almacenamiento y planificación energética para administrar la oferta y demanda

Dentro de las diferentes tecnologías de energías renovables, los sistemas solares tienen el potencial único de fusionarse directamente con el entorno urbano, pudiendo transformar las ciudades en instalaciones centrales de producción masiva de energía verde. Debido a la gran variedad de formas y funciones, los paneles solares (térmicos y fotovoltaicos) tienen propiedades excepcionales para ser utilizados en todo tipo de edificios y morfologías urbanas.

De ahí que la energía solar está estrechamente ligada a la forma, función y distribución de los edificios, más que a ninguna otra fuente de energía renovable. Es por ello que se requiere implementar procedimientos de planificación solar en que se consideren todos los requisitos especiales. Los sistemas solares pueden también desempeñar un papel en los edificios ya existentes y garantizar la captación solar, para lo cual se han desarrollado nuevas técnicas e instrumentos de análisis que incluyen, entre otras, la evaluación de envolventes edificatorias mediante tecnología de escaneo láser integrada a sistemas de información geográfica GIS o en algunos casos metodologías de evaluación en proyectos piloto en el contexto tipológico de la estructura urbana actual. Es fundamental utilizar las cifras ya disponibles y evaluar el potencial solar efectivo con mayor integración de tecnologías de captación solar, poniendo en práctica las investigaciones, prácticas y estrategias integradas al campo de planificación urbana y edificatoria.

En forma paulatina la energía solar ha ido incorporándose en las ciudades más desarrolladas, en un esquema autónomo, individual y financiado por el usuario. Desde principios de los años setenta del siglo pasado, se ha iniciado el desarrollo de la planificación solar en las diversas escalas. Solo desde el urbanismo es posible integrar actuaciones relevantes en las pequeñas y medianas escalas vinculadas a la eficiencia energética del entorno construido y establecer

estrategias solares desde los diversos documentos y escalas del planeamiento urbano (Higuera, 2012).

De allí la relevada importancia de conocer los métodos y herramientas utilizados, estudiar las experiencias desarrolladas de evaluación de la radiación solar incidente sobre las edificaciones y la conveniencia de cuantificar los valores de radiación solar en la mayor cantidad de localidades, orientaciones e inclinaciones posibles (González, 2011). El interés es que parte de esta energía se disipa en forma de calor intensificado por la radiación solar. Bajo ciertas condiciones este calor se acumula y es atrapado por las estructuras urbanas, lo que puede elevar las temperaturas en ciertas áreas urbanas producto de la forma en que se estructura la ciudad.

En este sentido, el objetivo del trabajo es presentar los avances de una investigación sobre algunos métodos y herramientas utilizadas a nivel internacional (casos de estudio), con el fin de seleccionar la más adecuada para la evaluación del potencial solar en los desarrollos multifamiliares locales. Se trata de realizar un análisis cualitativo de las herramientas de evaluación seleccionadas, comparar los métodos y procedimientos utilizados a fin de seleccionar la plataforma que más se adapte al estudio energético en los desarrollos multifamiliares urbanos locales (bloque abierto). El trabajo comprende la fase 1: revisión de literatura sobre captación de energía y optimización solar; la fase 2: análisis y comparación de las herramientas de planificación solar, métodos y técnicas aplicadas; selección de la herramienta. Los resultados destacan a Ecotect como plataforma apropiada para el estudio solar local debido a su capacidad de adaptación a las particularidades microclimáticas, sus instrumentos de análisis y manejo de geometría compleja.

1. DISCUSIÓN Y DESARROLLO

1.1. Fase 1: Revisión de literatura. Captación de energía y optimización solar

Como se refleja en algunos estudios, diversos autores han abordado el problema de la captación de energía solar en los entornos obstruidos densamente urbanizados. Los mismos proponen directrices de diseño o métodos, en búsqueda de garantizar la entrada solar en los espacios exteriores urbanos. Consideran que el derecho solar en el diseño urbano es esencial, pues permite rendimiento solar activo y pasivo en los edificios y espacios abiertos. Un diseño que no considera los derechos solares en edificios y áreas urbanas puede originar condiciones no favorables en las edificaciones y contexto circundante (Robinson et al., 2007).

Algunas investigaciones recientes parten de la necesidad de evaluar el diseño integrado entre envolvente, clima, iluminación y acondicionamiento. Dado que en las primeras etapas de la concepción arquitectónica se toman las principales decisiones de diseño, es necesario considerar las variables de implantación, orientación, tecnología constructiva y volumetría y los parámetros referidos a: relación parcela verde, factor de vista de cielo, densidad de construcción, área de superficie de la pared, zona de pavimento, albedo, entre otros (Gago et al., 2013). Estos factores determinan el grado de respuesta a los requerimientos de habitabilidad y perfilan el consumo energético durante el ciclo de vida.

Según Sosa (2011), la integración del aprovechamiento de la energía solar a nivel urbano pasa por analizar la adaptabilidad que presentan las superficies de los edificios para recibir y aprovechar la energía. Las fachadas, terrazas, cubiertas y elementos arquitectónicos deben concebirse buscando edificaciones más sostenibles y autónomas. En los próximos años se incrementará la introducción de la tecnología fotovoltaica en las edificaciones por tres razones: asociación entre diseño, materiales, innovación e integración arquitectónica de nuevos generadores fotovoltaicos.

La integración de sistemas fotovoltaicos en los edificios cuenta con múltiples ventajas: independencia energética, soporte para cubrir necesidades de consumo adaptando la potencia del sistema a las necesidades locales de consumo real, aprovechamiento de superficies no utilizadas en cubiertas y fachadas, ahorro en materiales de revestimiento como tejas, vidrios, cubiertas, ahorro en pérdidas por conducción. El autor afirma que deben considerarse condicionantes arquitectónicas como: orientación e inclinación de los módulos, sombreado entre edificios y los propios generadores, ventilación de los módulos y aumento de complejidad de las instalaciones del edificio.

Por otra parte, el factor densidad en las áreas urbanas condiciona la entrada solar. Es por ello que requiere ser manejada con la estructura de usos variados y combinados de la ciudad. La geometría de los edificios, proporción, altura, distancia entre sí, entre otras, marcan una influencia decisiva en el rendimiento energético futuro y calidad del entorno construido. La densidad se relaciona con el perfil, las dimensiones y orientación de las calles y espacios abiertos, aspectos que deben ser valorados y contextualizados en cada tejido urbano (Gago et al., 2013).

La distribución de los edificios y estructuras urbanas afecta las condiciones energéticas, interviene en el ahorro energético y condiciona los aspectos vinculados a la absorción de la energía solar, flujos de radiación solar y aire entre los edificios y formación de corrientes de viento que ayudan a la dispersión y absorción de energía (Ratti et al., 2003). Los efectos de la radiación solar y los movimientos del viento pueden controlarse a través del diseño urbano. Algunos estudios plantean estrategias que buscan reducir el impacto ambiental y aumentar el uso eficiente de los recursos.

La respuesta urbana a la radiación solar y flujos del aire puede ser controlada por medio del diseño urbano. Los estudios de Liu et al. (2012), que se centran en los aspectos de diseño urbano asociados al concepto de ecoeficiencia, demuestran que la atención de los aspectos de la energía en el diseño de ciudades más compactas podrían aumentar la ecoeficiencia. Esta opinión es compartida por Mindali et al. (2004), quienes sugieren que un aumento en la densidad urbana reduce el correspondiente consumo de energía.

Algunas investigaciones sobre efectos del diseño urbano en la construcción y consumo de energía plantean que, dependiendo del diseño urbano, puede variar en 10% la eficiencia energética de los edificios. Otros estudios estiman un aumento relativo mayor en el consumo de energía.

En esta línea investigativa, Svensson et al. (2002) analizaron las variaciones en la temperatura del aire y consumo de energía relacionado con la tipología de construcción (densidad urbana, multifamiliar y viviendas individuales). Los resultados demuestran que las zonas con menor temperatura son las menos densificadas y son las de mayor consumo energético. Desde esta perspectiva, Ratti et al. (2003) señalan que la captación de la radiación solar, así como los sistemas de utilización de luz y de protección a través del diseño urbano, constituyen estrategias relevantes de ahorro energético con fines de sustituir los combustibles convencionales y reducir la contaminación ambiental y el calor urbano.

En este campo sobre diseño y energía solar se demuestra que los parámetros referidos a cambios de geometría de construcción, diseño y orientación afectan el acceso solar a las áreas urbanas. De acuerdo con Mesa et al. (2011), la relación óptima de separación entre los edificios y su altura es $2/3$ y 1 en relación con su altura. La morfología resultante de alta densidad permite alcanzar niveles mínimos de intensidad de iluminación natural y ahorro de energía en el espacio interior y exterior. En esta línea de diseño, Leveratto (2004) afirma que los edificios con más sombra tienen fachadas con orientación menos favorable. Sin embargo, cuando se modifica la forma construida se podrían reducir los impactos en el entorno y aumentar el confort térmico y el ahorro de energía.

Los investigadores Kristl et al. (2001) llevaron a cabo la evaluación energética de la estructura de zonas urbanas y dimensión de las parcelas utilizando el iso-sombra método 5. Los resultados mostraron que para los edificios bajos ($H \leq 6$ m) resulta más lógico la orientación N-S. Para densidad edificatoria media-alta y edificios altos ($H \leq 12$ m y $H \leq 36$ m, respectivamente), no se plantea preferencia de orientación. Cuando compararon los edificios de igual altura y orientación y diferentes anchos, las distancias entre los edificios aumentaron ligeramente respecto al ancho del edificio y se modifica el sombreado.

En cuanto a la acumulación solar, Compagnon (2004) analizó los efectos de la construcción relativos a la geometría, diseño y orientación, en relación con el potencial de fachadas de algunos edificios y techos para fines de captación solar y utilización de la luz con fines energéticos. El resultado refleja que más del 30% de la superficie de las fachadas y techos resultan adecuados para aplicar las técnicas solares pasivas y sobre el 50% para técnicas solares activas.

En sus estudios, Yun et al. (2009) consideraron las implicaciones del entorno urbano en el diseño de sistemas fotovoltaicos y fachadas de edificio convencionales. En el ensayo los modelos térmicos y fotovoltaicos se integran en el modelo LT para explorar la eficiencia energética y medio ambiente ventilado, incorporado al diseño pasivo en el contexto urbano. El análisis revela que la integración fotovoltaica en un edificio no está necesariamente limitada a la orientación de la forma urbana, pues 80% se debe a la desviación del rumbo de los paneles solares.

En definitiva, los estudios de los diversos autores anteriormente descritos han abordado el problema del acceso solar, captación de energía y uso de los recursos en diversas experiencias analizadas en una diversidad de contextos y escalas construidas. Esto permite conocer y comprender los diferentes aspectos implicados en la captación de la energía, uso de los recursos y aprovechamiento solar. Los conceptos y experiencias de investigación examinadas posibilitan conocer los parámetros intervinientes en la evaluación del potencial solar en las prácticas urbana, en búsqueda de garantizar el acceso solar y el equilibrio y producción de energía en las áreas urbanas locales.

1.2. Optimización solar: rendimiento energético

La planificación urbana que aplica herramientas de optimización solar es una oportunidad para mejorar el rendimiento energético solar pasivo (menor demanda de luz y calefacción/refrigeración) y los recursos solares activos (fotovoltaicos y solares térmicos) mediante la utilización de los edificios como apoyo para la producción energética solar activa y la reducción de zonas sombreadas (Caamaño et al., 2011). El propósito es reducir las demandas energéticas de los edificios, moderando sus necesidades de calefacción y refrigeración, luz artificial y ventilación, y asimismo aumentar el potencial de la producción de energía utilizando los edificios como matriz de apoyo de producción energética.

Desde 1973 algunos países de la Unión Europea han empezado a pensar en la planificación solar, tal como se entiende actualmente. El propósito es integrar los aspectos solares en cada fase del proyecto urbano a fin de responder a la demanda de energía y uso de los recursos solares mediante el uso de técnicas pasivas y activas. La optimización solar provee una oportunidad para analizar los desarrollos urbanos existentes y los nuevos desarrollos en términos de puntos fuertes y débiles de rendimiento solar (Caamaño et al., 2011).

Otros elementos del diseño tales como techos, pavimentos y espacios verdes en las zonas urbanas, son componentes que pueden favorecer el enfriamiento de las superficies y contribuir a la reducción del consumo de energía. Algunos autores destacan el verde urbano como elemento que modera las temperaturas y favorece la evapotranspiración y sombreado

de las superficies. En los estudios se propone el verde urbano como estrategia para mitigar las consecuencias de las temperaturas más altas (Bowler et al., 2010).

Diversos análisis han demostrado que cuando hay deficiencia de espacios verdes el efecto de calor urbano se acentúa por las emisiones de gases de efecto invernadero (Gago et al., 2013). De igual forma, la refrigeración por evaporación y sombreado de los árboles genera enfriamiento de la atmósfera mediante interceptación de la radiación solar y previene el calentamiento de la superficie del suelo y del aire.

Los investigadores Wong et al. (2010) plantearon un nuevo tipo de arquitectura que se conoce como una matriz de planificación para espacios verdes de ciudades y edificios. Esto busca determinar los niveles de relación óptima del verde en los diferentes usos y aplicación de directrices de diseño. Según los autores, hay tres elementos que afectan temperatura urbana a escala local: los edificios, espacios verdes y pavimentos. Lo demostraron simulando los efectos de los sistemas en el consumo de temperatura y energía en los edificios. Los resultados mostraron que el 100% de cobertura de vegetación a partir de sistemas de verdor vertical fue eficaz en la reducción de la temperatura media radiante en las fachadas.

En relación con el albedo, Taha (1997) plantea que la distribución de la temperatura en las zonas urbanas se ve afectada por el balance de radiación urbano. La radiación solar incidente sobre las superficies urbanas se absorbe y se transforma en calor sensible. Los techos, superficies de los edificios, calles y plazas forman una masa grande que acumula calor. Este calor es emitido al medio ambiente en forma de radiación de onda larga; su intensidad depende de las superficies porcentuales visibles al cielo y las características de los materiales, tales como albedo, emisividad, inercia, térmica. El estudio realizado demuestra que el uso de materiales de alto albedo disminuye la radiación solar absorbida por envoltantes de edificios y estructuras urbanas.

Los pavimentos fueron estudiados como elementos del ambiente urbano por Doulos et al. (2004). El análisis realizado sobre materiales utilizados destaca las variaciones de la temperatura media diaria, producto de las diferencias del factor albedo de cada material. Según los autores, las superficies ásperas y colores oscuros (materiales “calientes”) tienden a absorber más radiación solar que las superficies planas lisas y de colores claros (materiales “fríos”). Por ello sugieren el uso de materiales fríos preferiblemente en entornos urbanos de clima cálido y materiales calientes en clima frío.

1.3. Métodos y herramientas de planificación solar

El propósito fundamental del proceso de planificación solar en los desarrollos urbanos es facilitar la integración de los aspectos solares que garanticen los niveles mínimos de la demanda de energía y el uso óptimo de los recursos solares. Sin embargo, existen grandes diferencias entre los procesos que se generan en las diversas escalas, lo que impide establecer un sistema multiescalar aplicable a todos los casos. Por esta razón es necesaria la utilización de diferentes herramientas para solventar problemas específicos.

Existen diversos sistemas de aplicación con variadas limitantes; algunas requieren mediciones especiales *in situ*, otras son solo aplicables a lugares. Asimismo, el uso de determinadas herramientas permite la optimización solar mediante el uso de directrices de referencia, indicadores y/o software adaptados a las condiciones urbanas y objetivos de la investigación. El uso del cálculo computacional ha permitido el desarrollo de metodologías de simulación cada vez más precisas y con un número mayor de variables capaces de mejorar el conocimiento y previsión de los procesos generados en el entorno urbano. Los programas informáticos han ido perfeccionando sus herramientas sobre análisis de sombreado entre edificaciones, acceso solar y fachadas que reciben radiación solar directa y difusa.

Un método muy utilizado es la técnica de simulación. Esta permite evaluar situaciones reales y compararlas con el plan original o con soluciones óptimas simuladas. Los modelos 3D contribuyen a predecir las condiciones solares en las fachadas y zonas sombreadas, asimismo estimar los cambios en las edificaciones que afectan la captación solar mediante la manipulación de dimensiones, volumen y densidad, orientación, altura y vegetación circundante, entre otros (Gómez et al., 2010).

Es de destacar que la tecnología computacional ha permitido desarrollar métodos con un mayor número de variables a fin de mejorar el conocimiento y previsión de procesos en el entorno urbano. En esta línea, Capeluto et al. (1997) establecen el método simple que utiliza envolventes solares acorde al diseño; el procedimiento orienta las etapas iniciales de diseño y no requiere modelos informáticos o numerosos datos de entrada. El proceso se desarrolla a través del uso del ordenador generativo SustArc, que admite generar y evaluar las diversas configuraciones edificatorias que aseguren el derecho solar de edificios y espacios abiertos.

En el año 2001 los autores plantean dos tipos de envolventes: el “derecho solar” y “colección de envolvente solar”. El primer tipo propone el máximo de altura de los edificios sin violar los derechos solares de los demás, en determinado período anual. El segundo tipo plantea el lugar más bajo de energía solar pasiva en la cubierta del edificio, sin sombreado de los edificios vecinos. El “volumen solar” entre ambas envolventes corresponde al volumen de edificios máximo que permita el acceso solar a los edificios cercanos.

Arumi-Noe (1979) elabora un modelo computarizado que determina la altura máxima permitida por edificio, sin violar los derechos solares de los otros edificios. Sugiere un método para asegurar el acceso solar a cada unidad residencial.

Los investigadores Schiller et al. (2005) plantean un programa informático de envolventes solares. Se basa en Knowles y Koester (1994) sobre armazones de energía con el uso de recursos pasivos (vientos y agua de lluvia).

En los estudios, Shaviv et al. (2002) trazan un nuevo código de energía que regule los derechos solares y defina la radiación solar necesaria por periodo anual. Se sustenta en los estudios sobre los efectos de la radiación solar y el consumo energético en los edificios y demuestran que durante las bajas temperaturas se puede reducir el consumo de energía. Destacan que el efecto de la radiación solar depende de la orientación de las fachadas; los influjos son influenciados por las orientaciones.

Igualmente, Capeluto et al. (2003) sugieren tres niveles de aplicación normativa. El nivel básico trata el enfoque de rendimiento y libertad en el diseño. El segundo nivel se refiere a las horas de insolación que exige conocimientos y el uso de software específico. Tercer nivel, método descriptivo sustentado en las horas de insolación indicadas. Otros estudios han generado instrumentos de evaluación mediante la simulación de modelos edificados, manipulación de situaciones, proyecciones de sombra y vistas axonométricas de proyección solar. Se requiere conocimiento computacional o apoyo de expertos.

En cuanto al aprovechamiento solar, algunos países han realizado diferentes estudios como respuesta a la crisis energética y ahorro de energía, reducción de la contaminación del aire, disminución de costos, y significancia de los factores vinculados a la radiación solar. Con esta finalidad se emplean herramientas de análisis solar a fin de valorar las condiciones de radiación según las características de diseño urbano, condición de las sombras y orientación. El propósito es definir las zonas adecuadas y las no adecuadas para las instalaciones solares activas o aperturas solares pasivas, e igualmente localizar las diversas fuentes de energía disponibles para el establecimiento de los sistemas.

En esta línea de investigación estudios relacionados con el tema han abordado los procedimientos generados en diversas herramientas de evaluación aplicadas mediante la

utilización de programas de simulación, manipulación de situaciones, proyecciones de sombra, vistas axonómicas con proyección del sol, entre otros. El uso de estas herramientas depende del conocimiento de los programas computacionales o apoyo de expertos. A continuación se presenta algunas herramientas aplicadas en diferentes estudios y experiencias de investigación en diversos contextos urbanos.

2. FASE 2: DESCRIPCIÓN, ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE HERRAMIENTAS DE ESTUDIO SOLAR URBANO

Esta fase presenta algunas herramientas aplicadas en algunos estudios y experiencias de investigación en diversos contextos urbanos, entre ellas destacan: herramienta SUNtool, herramienta Solene, RayMan, Autodesk Ecotect Analysis 2010, ENVI-met, describe los objetivos, métodos, software y modelos de cálculo aplicados.

Herramienta SUNtool

Enfoque multiescalar propuesto por Robinson (2011), con doble función, definición de pautas de diseño bioclimático y con fines educativos. El modelo (figura 1) facilita el análisis y comprensión de procesos generados en espacios construidos (Robinson et al., 2007). Los autores integran dos sistemas, la mesoescala, que simula condiciones a escala de ciudad, y la microescala detallada en los sectores de estudio.

Figura 1. Herramienta SUNtool

OBJETIVO	Realizar una modelación energética a partir de la estimación de las obstrucciones solares calculadas en el espacio urbano.
METODO	Interface que permite seleccionar la localización y datos inteligentes, valores climáticos y características de los edificios (ocupación, tipología, sistemas). La interfaz define la geometría 3D de edificios, características de simulación y datos de salida.
SOFTWARE	El primer componente, interfaz gráfica, es compatible con AutoCAD, ArchiCad, Sketchup, Rhino, y con herramientas LT, Ecotect y Tas. El segundo componente, motor de simulación 'Solver', integra módulos que calculan comportamiento microclimático, térmico, estocástico y vegetación.
MODELO DE CÁLCULO	Modelo de cálculo del espacio urbano y edificio basado en teorías de fluido dinámico e intercambio radioactivo con diferentes módulos de simulación: <ol style="list-style-type: none"> 1. Módulo microclimático: intercambio de radiación solar onda larga y corta, calor antropogénico y evapotranspiración. 2. Modulo consumo energético: demanda energética de edificios según características, ocupación, microclima y sombreado. 3. Modelo estocástico: Modificación de flujo de aire, temperatura y/o ocupación del espacio, residuos, energía e iluminación natural. Plantas

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de Robinson et al. (2007).

Herramienta Solene

Diseño de un modelo 3D para evaluar la concepción climática de proyectos de arquitectura (Miguet, 2008). El modelo analiza el comportamiento real del espacio urbano y se utiliza en su diseño, pautas de disposición, y morfología de edificaciones y distancias entre bloques a fin de permitir el aprovechamiento solar y la iluminación natural (figura 2).

Figura 2. Herramienta SOLENE

OBJETIVO	Soportar el diseño bioclimático de los edificios en el espacio urbano y formular conocimientos teóricos como base referencial para el diseño.
METODO	El modelo 3D integra diversos módulos de cálculo que integran: radiación solar, iluminación, efectos térmicos y confort. Incluye una malla que define el espacio urbano y el cielo hemisférico que simula la radiación difusa.
MODELO DE CÁLCULO	<p>Calculo de radiación solar:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Radiación solar e iluminación (W/m^2) y (lux) en las superficies urbanas, directa, indirecta y reflejada. -Mapas de repartición: distribución de radiación y sombras. -Iso-shadow: mapa de isolíneas del ratio de la radiación solar incidente. -Rosa de orientación: exposición solar de las fachadas por cada orientación. <p>Cálculo de simulación energética:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Temperatura superficial y flujo de energía de fachadas y entre superficies horizontales y atmósfera: cálculo de emisiones, flujo de calor y transferencia de calor por conducción. Datos de entrada: meteorológicos (temperatura, viento, nebulosidad o cobertura de nubes), materiales y propiedades físicas.

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de Miguet (2008).

Herramienta RayMan

Propuesta por Matzarakis et al. (2007), la misma proporciona una buena resolución de balance del flujo radiactivo y evaluación termofisiológica de las personas. Suministra el valor de temperatura media radiante (TMR) utilizada para determinar los índices de confort térmico (figura 3) y determina el grado de confort proveniente de árboles en parques urbanos. Permite el cálculo computacional en múltiples escenarios con bajo consumo de tiempo (Matzarakis, 2001). El modelo es de uso limitado por la exigencia de datos climáticos *in situ*.

Figura 3. Herramienta RayMan

OBJETIVO	Proporcionar el balance del flujo radiactivo y la evaluación termofisiológica de las personas
MÉTODO	Los datos de cálculo requeridos son: temperatura del aire, humedad, velocidad de viento y geometría del espacio. Es una interfaz sencilla
MODELO DE CÁLCULO	La herramienta incorpora el cálculo del SVF y su visualización en una imagen de ojo de pez. El software puede emplearse para la determinación de sombras, radiación solar media y máxima diaria y horas de sol

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de Matzarakis et al. (2007).

Herramienta Autodesk Ecotect Analysis 2010

Autodesk Ecotect Analysis 2010 orienta a los proyectistas en la fase inicial del diseño y en las fases sucesivas de evaluación de demandas y consumos energéticos. El modelo integra un módulo de estudio urbano enfocado a obtener la mejor orientación con fines de aprovechamiento solar.

El software Ecotect se utiliza en el análisis energético de los edificios, sin embargo, presenta una buena aproximación al análisis de radiación solar, componente factor cielo (SVF) y estudio de sombras, elementos importantes de diseño bioclimático en los espacios urbanos (Marsh, 2010). El método ha sido para estudiar la componente radiactiva y del SVF utilizado en la fase de análisis de la realidad. El software determina los procesos térmicos del espacio urbano (figura 4) pero no se aplica en rehabilitación urbana, pues no prevé modificación de los volúmenes de los edificios.

Figura 4. Herramienta Ecotect

OBJETIVO	Estudiar el comportamiento energético de los edificios. Incluye módulos de radiación solar, iluminación natural, consumo de agua y propagación del ruido. También analiza los componentes para diseño bioclimático de los espacios urbanos
METODO	Incorpora valores climáticos a través de la herramienta Weather Tool, datos de temperatura, radiación solar, intensidad y dirección de los vientos. Estos datos pueden visualizarse con diferentes sistemas y permite superposición con otros diagramas de aprovechamiento solar
MODELO DE CALCULO	Realiza cálculos avanzados de la componente solar analizando dos parámetros, factor vista al cielo y radiación solar incidente y reflejada en el espacio urbano. Los modelos geométricos 3D pueden realizarse directamente a través del módulo de diseño o desde otros programas como AutoCad, Revit o Sketchup

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de Marsh (2010).

Herramienta ENVI-met

De acuerdo con Wong et al. (2010), este instrumento permite evaluar el efecto de la presencia de vegetación en el espacio urbano y el efecto de absorción y reflexión de radiación solar, evapotranspiración y vegetación en diversos escenarios de rehabilitación urbana para la mitigación del microclima, objetivo central de la herramienta (figura 5).

Figura 5. Herramienta ENVI-met

OBJETIVO	Modelar la interacción entre superficies-plantas-aire en un entorno urbano, basado en los modelos fluidodinámicos y termodinámica (Bruse, 2012)
MÉTODO	Modelización 3D del espacio para obtener diversos resultados sobre parámetros meteorológicos, calidad del aire y confort. Los datos de entrada sobre geometría y datos climáticos de salida pueden recopilarse fácilmente desde estaciones meteorológicas cercanas

MODELO DE CÁLCULO	Cálculo avanzado de la componente solar en áreas específicas, analizando dos parámetros: factor de vista al cielo y radiación solar incidente y reflejada en el exterior. Los modelos 3D pueden realizarse directamente en el programa mediante módulo de diseño o desde AutoCad, Revit o Sketchup.
-------------------	---

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de Wong et al. (2010).

2.1. Comparación de herramientas de estudio solar urbano

Como se observa, la mayoría de herramientas presenta algunas coincidencias en el sistema de cálculo, elementos y datos requeridos en la evaluación energética y representación de la estructura urbana. La figura 6 presenta la comparativa entre las propiedades y características destacadas en los sistemas analizados.

Figura 6. Comparativa de herramientas

Herramienta	Transferencia Radiancia	Transmisión calor	Geometría	Materiales
SunTool	Intercambio de calor entre superficies y aire, elude radiación directa y reflejada	Intercambio calor entre superficies y el aire	Apoya sistemas 3D, AutoCad, ArchiCad Ecotec Sketchup	Deducción de materiales por defecto o por el usuario
SOLENE	Simula la claridad del cielo y la radiación de onda directa y reflejada	Calcula fluido de calor entre superficies y atmosfera	Permite la introducción y visualización de modelo 3D	Fija material envolvente en forma detallada
Rayman	Transmisión de onda-intercambio radiactivo	No se considera	Geometría en 3D Visualización 2D	No se considera
Ecotec	Radiación directa y reflejada, exporta datos a otros modelos	Aportaciones solares en simulación de edificios	Geometría en interfase gráfica o importada de otros modelos	Fija material envolvente y superficies reflectantes
ENVImet	Simula radiación directa, reflejada y emitida por el entorno urbano	Transmisión de calor ley Stefan-Boknan	Malla regular para introducir la geometría, se visualiza en 2D	Indica solo materiales de suelos, pero no edificios

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de Tumini Irina Tesis (2012)

2.2. Selección de la herramienta

En la revisión de los métodos y herramientas se evidencia que la mayoría de instrumentos utiliza cálculos numéricos que contribuyen a la predicción de horas de sol en fachadas, zonas sombreadas y cambios edificatorios intervinientes en la captación solar. Asimismo, coinciden en el uso de algunas variables y modelos 3D que son los más adaptados a la evaluación de escenarios de la realidad local (casos de estudio). El estudio comprueba que las

herramientas son de un alto nivel de complejidad. La realización de un modelo es laboriosa y compleja por la cantidad de factores intervinientes, sin embargo, el cálculo computacional apoya el avance hacia modelos más complejos cercanos a la realidad.

Ahora bien, tomando en consideración la descripción anterior de los métodos y con la finalidad de seleccionar la herramienta más adecuada para evaluar el potencial solar local, se plantean algunos criterios en función de los objetivos de la investigación, tales como: simplicidad, flexibilidad y adaptabilidad a las condiciones locales y disponibilidad de recursos técnicos. Una vez analizados los instrumentos acorde a los criterios señalados, se propone la plataforma Ecotect como alternativa para analizar la entrada solar y consumo energético en áreas exteriores. La misma satisface el compromiso entre la dificultad de realización del modelo, la consecución de los resultados y disponibilidad local de recursos técnicos para la realización de esta investigación, aun cuando, por información de Ecotect AutoDesk Analysis, actualmente existe discontinuidad en el otorgamiento de licencias adicionales del programa y distribución de funcionalidades en diferentes herramientas y aplicaciones informáticas adicionales, tales como Revit, Daylight Analysis, Green Building Studio y Formit 360. Sin embargo, el uso de la licencia Ecotect garantiza la vigencia de los alcances y objetivos, métodos de cálculo y los algoritmos. Estos continúan siendo válidos para la visualización directa de los resultados, al igual que para evaluar y cuantificar la distribución del potencial solar, el impacto de la luz solar y el estudio de las sombras.

Es importante destacar la condición interactiva de esta herramienta en el análisis solar de los desarrollos tipológicos a nivel local. El software posee la ventaja de permitir, en cualquier momento en el tiempo y en cualquier intervalo requerido, la visualización de los resultados de evaluación de radiación directa y difusa de manera simple, organizada y directa. Además, admite incorporar la data climática local, facilita la transferencia de la geometría y aumenta la velocidad de cálculo de ganancia solar debido a la simplicidad de entrada de datos, capacidad de importar geometría y gráficos y exportar resultados a herramientas más avanzadas. Ecotect aplica la simulación del patrón de intensidad y distribución de la radiación solar en las superficies, combina una interfaz gráfica con herramientas de análisis disponibles en su plataforma para el análisis de las cargas térmicas, flujo del aire, iluminación, sombras y reflexión, protecciones solares, radiación solar y acústica. Todas estas propiedades mantienen vigencia en la aplicación.

3. CONCLUSIONES

El tema analizado sobre la aplicación de métodos y herramientas en experiencias prácticas de evaluación aplicadas a nivel internacional permitió conocer y evaluar los procedimientos utilizados y los factores intervinientes en el diseño adecuado de instalaciones de aprovechamiento de energía solar. La investigación demostró la aplicabilidad de los instrumentos en el análisis del comportamiento térmico-energético y la contribución del cálculo computacional en la obtención de datos relativos al consumo energético, requerimientos, condiciones climáticas, y las condiciones de confort y ganancia solar en las áreas exteriores urbanas.

El proceso de análisis destacó las ventajas técnicas de la plataforma Ecotect en el estudio y retroalimentación de la información y predicción de la condición energética del espacio exterior. Se comprobó que el sistema proporciona a los usuarios beneficios cuando se conocen los alcances y limitaciones del software en cuanto al análisis y evaluación del rendimiento energético en áreas urbanas. Asimismo la utilización de equipos sencillos y posibilidad de acceso al programa de forma gratuita también influyó en la selección de esta herramienta como instrumento de evaluación solar local.

Tal como se observa, el estudio sobre la energía solar es un tema extenso y complejo, del cual solo se ha avanzado un aspecto parcial, por ello es susceptible continuar desarrollando y complementando distintos procesos que confluyan en la temática. Actualmente la investigación avanza hacia el desarrollo y aplicación de una metodología de evaluación y planificación solar del microespacio urbano, definición de técnicas y procedimientos aplicables en el aprovechamiento y captación de energía, uso eficiente y consumo de recursos y optimización solar local.

4. REFERENCIAS

Arumi, F. (1979). Computer-aided energy design for buildings, energy conservation through building design. Publisher McGraw-Hill, NY.

Bowler, D., Buyung-Ali, L., Knight, T. y Pullin, A. (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, vol. 97, pp.147–55.

Bruse, M., Wania, A., Blond, N. y Weber, C. (2012). Analyzing the influence of different street vegetation on traffic-induced particle dispersion using microscale simulations. *Journal of Environmental Management*, vol. 94 (1), pp. 91-10.

Caamaño, E., Higuera, E. y Neila, J. (2011). Hacia un urbanismo solar. Proyecto europeo Polis Energías renovables 2010-2020. Instituto de Energía Solar-Universidad Politécnica de Madrid. Grupo Arquitectura Bioclimática en un Entorno Sostenible-Universidad Politécnica de Madrid. Documento en línea: <http://www.polis-solar.eu/>.

Capeluto, I. y Shaviv, E. (1997). Modeling the design of urban grids and fabric with solar rights considerations. ISES. Solar World Congress, Korea, Proceedings Korea: IER.

Capeluto, I., Yezioro, A., Bleiberg, T., Gat, D. y Shaviv, E. (2003). Climatic and energy aspects of urban design in a hot-humid region of Israel. *Monird*, n° 17-03, p. 296.

Compagnon, R. (2004). Solar and daylight availability in the urban fabric. *Energy and Buildings*, vol. 36, pp. 321-328.

Doulos L., Santamouris M. y Livada I. (2004). Passive cooling of outdoor urban spaces. The role of materials. *Solar Energy*, vol. 77, pp. 231- 49.

Gago, E., Roldán, J., Pacheco, R. y Ordóñez J. (2013). The city and urban heat islands: Are view of strategies to mitigate adverse effects. Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería. *Renewable and Sustainable Energy Reviews Journal*. España. Documento en línea: <http://www.elsevier.com/locate/rser> RenewableandSustainableEnergy, pp. 749–758 (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113003602>).

Gómez, N. (2012). Control ambiental del espacio urbano. Estrategias para el control microclimático del espacio entre edificaciones en clima cálido-húmedo. 253 p. Tesis (Doctorado en Ciencias Ambientales) - Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.

Gómez, N., Rojas, A. e Higuera, E. (2010). *Parámetros (PS) sostenibles en el planeamiento y diseño ambiental del espacio microurbano (Venezuela)*. Pluris 2010. 4to Congreso Luso-Brasileiro para O Planeamento Urbano, Regional, Integrado. Sustentavel. Portugal, Memórias: fro UA, pp. 223-234.

González, E. (2011). Estimación de la irradiancia solar global en las envolventes de un edificio estándar en la ciudad de Santiago, región metropolitana, mediante un modelo de

simulación. 54 p. Tesis (Doctorado en Ciencias Meteorológicas), Escuela de Postgrado, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile, Santiago.

Higuera, E. (2012). La ciudad solar. Instituto Juan de Herrera- Escuela de Arquitectura de Madrid ETSAM. *Cuadernos de Apoyo a la Docencia*, n° 390, p. 40.

Knowles, R. y Koester, R. (1994). Energy armatures - Ordering an integration of passive energy resources for community sustainability. Proceedings: 19TH. National Passive Solar Conference - ASES. San José, CA.

Kristl, Z. y Krainer A. (2001). Energy evaluation of urban structure and dimensioning of building site using iso-shadow method. *Solar Energy*, vol. 70 (1), pp. 23-34.

Leveratto, M (2004). Urban planning instruments to improve winter solar access in open public spaces. *Environmental Management and Energy and Buildings*, vol. 36, pp.321-328.

Liu, Y., Song, Y. y Arp, H. (2012). Examination of the relationship between urban form and urban eco-efficiency in China. *Habitat International*, vol. 36, pp.171-177.

Marsh, A. (2010). Thermal modelling: The Autodesk - Ecotec (Version 5.6). Documento en línea: <http://www.squ1.com>

Matzarakis, A. (2001). Assessing climate for tourism purposes: Existing Methods and tools for the thermal complex. Meteorological Institute, University of Freiburg, Germany.

Matzarakis, A., Rutz, F. y Mayer, H. (2007). Modeling radiation fluxes in simple and complex environments - Application of the RayMan Model. *International Journal of Biometeorology*, vol. 51, n° 4, pp. 323-334.

Mesa, N., Corica, L. y Pattini, A. (2011). Evaluation of the potential of natural light to illumination buildings in dense urban environment. A study in Mendoza, Argentina. *Renewable Energy*, vol. 36, pp. 2414-2423.

Miguet, F. (2008). A further step in environment and bioclimatic analysis: The software toll Solene. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, vol. 2, n° 1, pp. 58-67.

Mindali, O., Raveh, A. y Salomon, I. (2004). Urban density and energy consumption: A new look at old statistics. *Transportation Research Part A*. vol. 38, pp. 43-62.

Ratti, C., Raydan, D. y Steamers, K. (2003). Building form and environmental performance: Archetypes, analysis and an arid climate. *Energy and Buildings*, vol. 35, pp. 3-14.

Robinson, D., Campbell, N., Gaiser, W., Kabel, K., Le-Mouel, A., Morel, N., Page, J., Stankovic, S. y Stone, A. (2007). SUNtool - A new modeling paradigm for simulating and optimizing urban sustainability. *Publisher Solar Energy*, vol. 81, pp. 1196-1211.

Robinson, D. (2011). Computer modeling for sustainable urban design: Physical principles, methods and applications. Earthscan Publications Ltd, London. Routledge Publisher, London and USA.

Robinson, D. y Stone, A. (2004). Solar radiation modeling in the urban context. *Solar Energy*, vol. 77, pp. 295-309.

Schiler, M. y Uen-Fang, P. (2005). *Solvepe: An interactive computer program for defining and drawing solar envelopes*. Proceedings: 18TH. National Passive Solar Conference - ASES. Washington, D.C.

Shaviv, E., Capeluto I., Yezioro A., Becker R. y Varshavsky, A. (2002). Thermal performance of buildings and the development of guidelines for energy conscious design, Part A: Residential buildings. Sponsored by the Ministry of National Infrastructures. Technion Research and Development Foundation Ltd.

Sosa, M. (2011). Desarrollo de método paramétrico para determinar índices de eficiencia energética para fachadas en edificios con sistema de acondicionamiento activo, ambiente y sostenibilidad. Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción (IDEC), Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad Central de Venezuela, p.19.

Svensson, M. y Eliasson, I. (2002). Diurnal air temperatures in built-up areas in relation to urban planning. *Landscape and Urban Planning*, vol. 61, pp. 37-54.

Tumini Irina (2012). El microclima urbano en los espacios abiertos. Estudio de casos en Madrid. 388 p. Tesis (Doctorado en Ciencias Ambientales) - Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.

Taha, H. (1997). Urban climates and heat islands: Albedo, evapotranspiration and anthropogenic heat. *Energy and Buildings*, vol. 25, pp. 99-103.

Wong, N. y Kwang, T. (2010). Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls. *Building and Environment*, vol. 45, n° 3, pp. 663-672.

Yun, G. y Steemers, K. (2009). Implications of urban settings for the design of photovoltaic and conventional facades. *Solar Energy*, vol. 83, pp. 69-80.