ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO Y OPTIMIZACIÓN DEL RECURSO SOLAR EN EL PLANEAMIENTO DE ÁREAS URBANAS (Venezuela)

N. Gómez, E. Higueras, A. Rojas, J. A. Indriago, M. Ferrer

RESUMEN

El objetivo de la ponencia es presentar los resultados de una investigación sobre herramientas aplicadas a nivel internacional (casos de estudio), métodos y procedimientos utilizados y contribución en la evaluación del potencial solar y estrategias de optimización solar. Los resultados comparativos permitieron identificar herramientas con posibilidad de adaptación en la integración de los aspectos solares en las áreas urbanas mediante tecnología adecuada para impulsar el desarrollo energético local. El trabajo comprende tres fases, Fase 1: fundamentos teóricos sobre captación de energía y uso eficiente de recursos, optimización solar y rendimiento energético, métodos y herramientas de planificación solar, Fase 2: descripción, análisis y evaluación de métodos, herramientas aplicadas, estudio comparativo; Fase 3: resultados y selección de la herramienta. Los resultados destacan a ECOTECT como la plataforma más apropiada para evaluar el potencial solar local por su capacidad de adaptación al microclima local, sus instrumentos de análisis y manejo de geometría compleja.

1 INTRODUCCION

Las poblaciones urbanas aumentan rápidamente en tamaño y complejidad debido a que más personas emigran a las ciudades, por esta razón las ciudades requieren grandes cantidades de energía para funcionar correctamente, sus habitantes consumen altos porcentajes de recursos energéticos como resultado de las actividades realizadas en el medio ambiente urbano. Las edificaciones tienen un impacto significativo en el uso de la energía y el medio ambiente, por lo tanto, fomentar el aprovechamiento extensivo de la radiación solar en ciudades se presenta como una estrategia viable para un desarrollo sustentable y puede constituir un aporte significativo en la reducción del consumo de las actuales fuentes energéticas fósiles, con la consiguiente disminución de las emisiones contaminantes (Gago et al. 2013). La cuantificación de la radiación solar incidente sobre las edificaciones es relevante para el diseño adecuado de instalaciones de aprovechamiento de la energía solar, de allí la conveniencia de obtener con detalle los valores de radiación solar en las localidades, según orientaciones e inclinaciones posibles (González, 2011). Por esta razon es necesario ocuparse de la producción y ahorro de energía con el fin de enfrentar el reto de asumir el potencial de fuentes de energía disponibles a nivel local e implementar políticas para su aprovechamiento.

Además de trabajar intensamente en el ahorro de energía y eficiencia energética, nos enfrentamos al reto de asumir el potencial de las diversas fuentes de energía disponibles a nivel local. Según Caamaño *et. al*. 2011, dentro de las distintas tecnologías de energías renovables los sistemas solares tienen el potencial único de fusionarse directamente con el

entorno urbano, logrando transformar las ciudades para producción masiva de energía verde no contaminante. Por esta razón, la forma de las construcciones y superficies son decisivas para el rendimiento solar activo y pasivo, lo que requiere implementar detallados procedimientos de planificación solar que consideren los requisitos morfológicos de las estructuras urbanas.

La planificación solar se empezó a desarrollar a principios de los años 1970, solo desde el urbanismo es posible integrar actuaciones de eficiencia energética en las pequeñas y medianas escalas y establecer estrategias solares desde los diversos documentos y escalas de planeamiento urbano (Higueras, 2012). Los sistemas solares desempeñan también un papel importante en garantizar el potencial solar en los edificios ya existentes mediante el desarrollo de nuevas técnicas e instrumentos de análisis a través de sistemas de información geográfica GIS o en proyectos pilotos en el contexto tipológico de la estructura urbana actual (POLIS, 2011). Por ello es necesario analizar diferentes herramientas y tecnologías de captación solar utilizando las investigaciones, prácticas desarrolladas y estrategias integradas al campo de la planificación urbana y edificatoria, asimismo analizar las experiencias aplicadas a fin de conocer los métodos y herramientas de planificación solar utilizadas, su aplicación y limitantes lo que puedan orientar el estudio del potencial solar y el planeamiento energético en la microescala urbana local.

El objetivo de la ponencia es presentar los resultados de una investigación que indaga los diversos métodos y herramientas aplicados a nivel internacional (software), su contribución a la evaluación del rendimiento energético y el uso óptimo de los recursos solares. El propósito es realizar un análisis cualitativo de las herramientas seleccionadas, comparar los métodos y procedimientos utilizados a fin de destacar la más adecuada para evaluación del potencial y planificación solar en las áreas de los desarrollos multifamiliares a nivel local (Bloque abierto). El trabajo comprende tres fases, Fase 1: literatura relevante relativa a la captación de energía y uso eficiente de los recursos, optimización solar y rendimiento energético Fase 2: descripción, análisis y evaluación de los métodos y herramientas aplicadas, estudio comparativo; y Fase 3: análisis de resultados y selección de la herramienta para estudio del potencial solar. Los resultados destacan a ECOTECT como la plataforma más apropiada para la evaluación del potencial solar por su capacidad de adaptación al microclima local, instrumentos de análisis y manejo de geometría compleja.

2 REVISION DE LITERATURA

A continuación se presentan algunos fundamentos teóricos y conceptos claves sobre captación de energía solar y uso eficiente de los recursos, optimización solar y rendimiento energético.

2.1 Captación de energía y uso eficiente de recursos en el medio urbano

Algunos investigadores han abordado el problema de acceso solar en los entornos construidos densamente urbanizados y han arrojado directrices que buscan garantizar o controlar la entrada solar en las áreas exteriores urbanas. Los estudios realizados destacan la consideración de los derechos solares en el diseño urbano como esencial ya que permite el rendimiento solar activo y pasivo de las edificaciones y mejora las condiciones de los habitantes en las calles, aceras y espacios abiertos. Un diseño que no considere los derechos solares puede generar condiciones no favorables en los edificios y su contexto. De acuerdo a Gago (2013), desde las primeras etapas de diseño es necesario considerar los aspectos de implantación del edificio y los parámetros relativos a la relación parcela verde, factor de vista de cielo, densidad de construcción, área de superficie de pared, pavimento,

albedo, entre otros. Estos factores condicionan el microclima y determinan el grado de respuesta a los requerimientos de habitabilidad de los usuarios y perfilan el consumo energético durante el ciclo de vida de las edificaciones. El diseño urbano es vital para cualquier noción de sostenibilidad ya que permite hacer uso de fuentes de energía en espacios exteriores. Esta noción ayuda a conocer cómo afecta la estructura del entorno construido la condición energética derivada de la interacción entre el clima y componentes del microespacio (Gómez, 2012).

Según Sosa (2011), la integración del aprovechamiento de energía solar a nivel urbano pasa por estudiar la adaptabilidad que presentan las superficies para recibir y aprovechar la energía. Las fachadas, terrazas y cubiertas, así como los elementos arquitectónicos deben concebirse acorde a la sostenibilidad y autonomía energética. El autor plantea que en los próximos años se incrementará la introducción de la tecnología solar en los entornos urbanos con el fin de cubrir las necesidades de consumo adaptadas al consumo real, aprovechamiento de superficies no utilizadas (cubiertas, fachadas), ahorro en materiales de revestimiento (tejas, vidrios, cubiertas), ahorro en pérdidas o ganancias por conducción. Asimismo, las condicionantes arquitectónicas de orientación, sombreamiento entre edificios, ventilación y complejidad de instalaciones.

En la actualidad las morfologías urbanas favorecen las geometrías verticales las cuales configuran un complejo escenario donde se distribuye la radiación solar de manera irregular producto de los efectos dinámicos generados por las sombras sobre las edificaciones lo cual puede mitigar ampliaciones o reducciones de disponibilidad de radiación solar (Freitas *et. al*. 2014). La distribución de los edificios y la estructura urbana afecta las condiciones energéticas, actúa en el ahorro energético y condiciona los aspectos de absorción de energía solar, flujos de radiación solar y aire entre los edificios y formación de corrientes de viento que favorecen la dispersión y absorción de energía. Liu *et. al.* 2012, aborda los aspectos de diseño urbano asociados al concepto de eco-eficiencia y plantean como la atención de los aspectos de energía en el diseño de ciudades más compactas podrían aumentar la eco-eficiencia. Esta posición sugiere que un aumento de densidad reduce el consumo de energía.

En cuanto a la densidad Cheng *et. al*. 2006, analizan su influencia en el acceso de luz urbana y potencial solar. Los resultados revelan que los factores luz del día, factor de vista al cielo y potencial solar dependen de la relación con la parcela, mientras el potencial solar de fachadas depende de la cobertura del sitio y al grado de obstrucción horizontal. Los investigadores plantean que la captación de radiación solar, iluminación y protección a través del diseño constituyen estrategias de ahorro energético y demuestran que los parámetros referentes a cambios de geometría, diseño y orientación condicionan el acceso solar. Esta línea de diseño sostiene que los edificios más sombreadas tienen fachadas con orientación más o menos favorable según los requerimientos climáticos. Al modificar la forma construida es posible reducir los impactos del entorno y aumentar el confort térmico y el ahorro de energía.

En cuanto a la acumulación solar, Compagnon (2004) estudia los efectos de la geometría, diseño y orientación vinculados al potencial de fachadas y techos con fines energéticos. Demuestra que más del 30% de la superficie de fachadas y techos resultan adecuadas para las técnicas solares pasivas y el 50% para técnicas solares activas.

2.2 Optimización solar y rendimiento energético

Es una oportunidad para mejorar el rendimiento energético solar pasivo y el recurso solar activo (fotovoltaico y térmico) utilizando los edificios como apoyo para producción de energía solar activa y control de áreas sombreadas (POLIS). La optimización solar provee

una oportunidad en la evaluación de desarrollos urbanos existentes y nuevos desarrollos en términos de puntos fuertes y débiles de rendimiento solar.
Uno de los parámetros a considerar es el flujo del aire y su relación con el diseño urbano, es el caso de la combinación de edificios altos y calles estrechas que atrapa aire caliente y reduce el flujo con vientos de baja velocidad que afectan la captación de energía y favorece el efecto de calor urbano (Gago *et. al.* 2013). La relación diseño y energía analiza los vínculos entre rugosidad y flujo del aire mediante métodos que determinan el valor de la rugosidad (conexión entre viento y fuerza de arrastre). Se comprueba que los edificios altos generan múltiples reflexiones de radiación horizontal lo cual aumenta la probabilidad que la energía permanezca en la superficie del suelo.
Otros elementos tales como techos, pavimentos y espacios verdes, pueden favorecer el enfriamiento de las superficies y la reducción del consumo de energía. El verde urbano se destaca como moderador de temperaturas y de procesos de evapotranspiración y sombreado de superficies (Bowler *et. al.* 2010). La evaporación y sombreado de los árboles genera enfriamiento de la atmósfera por interceptación de la radiación solar que previene el calentamiento de la superficie del suelo y del aire.
Conforme a Wong *et. al.* 2011, existen tres elementos que afectan la temperatura urbana a escala local, los edificios, los espacios verdes y los pavimentos. Según los autores el 100% de cobertura de vegetación en sistemas de verdor vertical resulta eficaz en la reducción de la temperatura media radiante en las fachadas de cristal. Existe correlación lineal entre el coeficiente de sombra y el índice de área foliar, un índice de sombreado inferior conduce a un mayor aislamiento térmico.
En cuanto al factor albedo, Taha (1997) sostiene que la distribución de temperatura en las zonas urbanas es afectada por el balance de la radiación urbana. La radiación solar incidente sobre superficies urbanas es absorbida y transformada en calor sensible, los techos y superficies forman una masa donde se acumula el calor que se emite al medio ambiente. La intensidad de la onda depende de las superficies visibles al cielo y las características de los materiales. El uso de materiales de alto albedo reduce la radiación solar absorbida por las envolventes y estructuras urbanas.
Los pavimentos analizados por Doulos *et. al*. 2004 sobre materiales comúnmente utilizados en los espacios urbanos, destacan las variaciones de temperatura media diaria producto de las diferencias del factor albedo de cada material. Plantean que las superficies ásperas y de colores oscuros (materiales calientes) tienden a absorber más radiación solar que las superficies planas lisas y de colores claros (materiales fríos). Igualmente sugieren el uso de materiales fríos preferiblemente en entornos urbanos de clima cálido y materiales calientes en climas fríos.

3 MÉTODOS Y HERRAMIENTAS DE PLANIFICACIÓN SOLAR

El objetivo principal del proceso de planificación solar es facilitar en áreas urbanas la integración de los aspectos solares a fin de garantizar los niveles mínimos de demanda de energía y prevenir el uso óptimo de los recursos solares. Sin embargo, uno de los principales problemas para el estudio solar en los espacios urbanos es la determinación de la escala a estudiar, existen grandes diferencias en los procesos que se generan en las diversas escalas lo que impide establecer un único sistema multiescalar aplicable a todos los casos. Por ello se opta por la utilización de diferentes herramientas, es necesario indagar ya que existen diversos sistemas de aplicación con variadas limitantes y requerimientos, algunas demandan mediciones especiales in situ; otras son aplicables a lugares concretos, en otros contextos pueden no describir las condiciones reales.

El uso de determinados instrumentos permite lograr la optimización solar mediante utilización de directrices de referencia, indicadores y/o herramientas (software) adaptadas a las condiciones urbanas y los objetivos de evaluación. En este sntido, el uso del cálculo computacional ha permitido el desarrollo de metodologías de simulación cada vez más elaboradas capaces de considerar un número mayor de variables para mejorar el conocimiento y previsión de los procesos que se generan en el entorno urbano. Los diversos programas informáticos han ido perfeccionando sus técnicas para evaluar el sombreado entre edificaciones, acceso solar y la cuantificación de fachadas que reciben radiación solar directa, entre otras.
Un método muy utilizado para la optimización solar y el rendimiento energético es la técnica de simulación que permite evaluar las situaciones reales y comparar las diferentes situaciones con el plan original o con soluciones óptimas simuladas. El uso de las simulaciones en 3D ayuda a predecir diversas condiciones tales como horas de sol directo en fachadas y zonas sombreadas, igualmente los cambios de un edificio o conjunto de edificios que pudiesen intervenir en la captación del potencial solar mediante manipulación de las edificaciones, cambios de dimensiones, volumen y densidad, variación de la orientación, altura y vegetación circundante, entre otros.

3.1 Descripción y análisis comparativo de herramientas de estudio del potencial solar urbano

A continuación se describen y analizan algunas herramientas aplicadas en diversos contextos y experiencias de investigación (casos de estudio) tales como: Herramientas SUNtool, Solene, RayMan, Autodesk Ecotect Analysis 2010, ENVI-met, considerando objetivos, modelo, software y modelo de cálculo aplicado.

Herramienta SUNtool

Consiste en un enfoque multiescalar propuesto por Robinson (2011) desarrollado con doble función, para la definición de pautas de diseño bioclimático y con fines educativos, facilita el análisis y comprensión de los procesos producidos en el espacio construido. La herramienta considera la integración de dos sistemas: la mesoescala que simula las condiciones a nivel de ciudad y a escala más detallada los barrios en estudio (Tabla 1).

Tabla 1. Herramienta SUNtool

OBJETIVO	Realizar una modelación energética a partir de la estimación de las obstrucciones solares calculadas en el espacio urbano.
METODO	Es una interface donde el usuario puede seleccionar la localización y datos inteligentes incluyendo valores climáticos y características de los edificios (ocupación, tipología, sistemas de acondicionamiento, etc.). En la interfaz se define la geometría 3D de edificios, características de la simulación y datos de salida.
SOFTWARE	El primer componente, interfaz gráfica, es compatible con los principales software de diseño: CAD, ArchiCad, Sketchup, Rhino, y las herramientas de modelación ambiental como LT, Ecotect y Tas. El segundo componente el motor de simulación 'Solver', constituido por diferentes módulos que pueden calcular separadamente el comportamiento microclimático, térmico, estocástico y de vegetación
MODELO DE CALCULO	Integra un modelo de cálculo dinámico del espacio urbano y el edificio basado en las teorías de fluido dinámico e intercambio radioactivo compuesto por diferentes módulos de simulación: -Microclimático: basado en aplicación de principios de hidrodinámica, intercambio

	de radiación solar de onda larga y corta, calor antropogénico y evapotranspiración. -Consumo energético: evalúa la demanda energética de los edificios según características, ocupación, influencia del microclima y sombras. -Modelo estocástico: Referido a modificación del flujo de aire y temperatura y/o ocupación del espacio, generación de residuos, energía y biogás y uso de iluminación natural asociada a la ocupación. -Plantas: dimensionamiento plantas de distribución de energía y agua.

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de Robinson 2007

Herramienta SOLENE

La herramienta aplicada por Miguet (2008) se basa en el diseño de un modelo 3D para evaluar la concepción climática de los proyectos de arquitectura. El sistema se aproxima al comportamiento real del espacio urbano pero la calidad de resultados depende de la calidad y precisión de los datos de entrada, lo que limita el modelo. El objetivo es apoyar el diseño de nuevos espacios urbanos y generar pautas para disposición y morfología de edificaciones, calles, distancias entre bloques y permitir el aprovechamiento solar e iluminación natural (Tabla 2).

Tabla 2. Herramienta SOLENE

OBJETIVO	Soportar el diseño bioclimático de los edificios en el espacio urbano y formular conocimientos teóricos que constituyan una base referencial en el diseño arquitectónico.
METODO	El modelo 3D integra diferentes módulos de cálculo que incorporan radiación solar, iluminación y efectos térmicos, condiciones exteriores y confort de los usuarios. El modelo está compuesto por una malla que define el espacio urbano y un cielo hemisférico que simula la radiación difusa.
MODELO DE CALCULO	Calculo de radiación solar: -Radiación solar e iluminación: cantidad de radiación solar (W/m2) y de iluminación (lux) recibida por las superficies urbanas, directa, indirecta y reflejada. -Mapas de repartición: distribución de la radiación, zonas sombreadas. -Iso-shadow: representación en un mapa de isolíneas del ratio de la radiación solar incidente en edificios y zonas no obstruidas. -Rosa de orientación: exposición solar de fachadas por orientación. -SVF: expresado en un mapa con valores de 0 a 1. Cálculo de simulación energética: -Temperatura superficial y flujo de energía de las fachadas y entre superficies horizontales y atmosfera; cálculo de emisiones de superficies, flujo de calor entre aire y superficie y transferencia de calor por conducción. Datos de entrada: indicación temporal, datos meteorológicos in situ (temperatura del aire, velocidad y dirección del viento, nebulosidad o cobertura de nubes) y descripción detallada de materiales y propiedades físicas.

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de Miguet 2008

Herramienta RayMan

El instrumento propuesto por Matzarakis *et. al.* 2007, es sencillo y capaz de proporcionar una buena resolución del balance del flujo radioactivo y la evaluación termo fisiológica de las personas. Suministra el valor de Temperatura Media Radiante (TMR) utilizada para determinar índices de confort térmico, PMV38, el PET39 y SET40.
El software es empleado para conocer el grado de confort proporcionado por los árboles en parques urbanos, la ventaja es que permite el cálculo computacional en muchos escenarios y con baja inversión de tiempo pero de uso limitado por la exigencia de datos climáticos

medidos in situ. La herramienta representa una alternativa complementaria ya que no permite determinar valores climáticos predictivos (Tabla 3).

Tabla 3. Herramienta RayMan

OBJETIVO	Proporcionar el balance del flujo radioactivo y la evaluación termo fisiológica de las personas.
METODO	Los datos de cálculo requeridos son; temperatura del aire, humedad y velocidad de viento, y definición de la geometría del espacio. Una interfaz gráfica muy sencilla permite definir la geometría del espacio.
MODELO DE CALCULO	La herramienta incorpora el cálculo del SVF y su visualización en una imagen de ojo de pez. El software también puede emplearse para la determinación de sombras, radiación solar media y máxima diaria y las horas de sol.

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de Matzarakis 2007

Herramienta Autodesk Ecotect Analysis 2010

El software de simulación y análisis energético Autodesk Ecotect Analysis 2010 (Tabla 4) orienta a los proyectistas en las primeras fases de diseño de edificios y en las fases sucesivas en la evaluación de demandas y consumos energéticos. Integra un módulo de estudio urbano enfocado a obtener la mejor orientación con fines de aprovechamiento solar.

Ecotect se en el estudio energético de los edificios, sin embargo, el sistema realiza una buena aproximación al análisis de radiación solar, componente de cielo y estudio de sombras, elementos importantes en el diseño bioclimático de los espacios urbanos (Marsh, 2010). El método ha sido empleado como sistema complementario para estudiar la componente radioactiva y del SVF en la fase de análisis del estado actual. La información sobre la radiación solar contribuye a determinar los procesos térmicos en el espacio urbano, sin embargo, el uso del software es limitado en los procesos de rehabilitación urbana ya que no prevé modificación sustancial de los volúmenes de edificios.

Tabla 4. Herramienta Ecotect

OBJETIVO	Estudiar los diferentes comportamientos energéticos de los edificios, incluye módulos de análisis de la radiación solar, iluminación natural, consumo de agua y propagación del ruido. Analizar los componentes del exterior para el diseño bioclimático de los espacios urbanos.
METODO	Incorpora valores climáticos específicos a través de la herramienta Weather Tool, también datos de temperatura, radiación solar, intensidad y dirección de los vientos. Estos datos pueden consultarse con diferentes sistemas de visualización y permite superposiciones con otros diagramas de aprovechamiento solar.
MODELO DE CALCULO	Realiza cálculos avanzado de la componente solar analizando dos parámetros, el factor vista al cielo y la radiación solar incidente y reflejada en el espacio urbano. Los modelos geométricos 3D de los casos de estudio 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

Se emplea en numerosas investigaciones de simulación microclimática del espacio urbano y ha sido diseñada para simular las condiciones en la micro-escala (Tabla 5). De acuerdo a Wong *et. al.* 2010, el instrumento permite evaluar el efecto de la presencia de la vegetación

en el espacio urbano simulando el efecto de absorción y reflexión de radiación solar, y el efecto de evapotranspiración, asimismo simular el efecto de vegetación en diferentes escenarios de rehabilitación para mitigación del microclima, razón principal del estudio de la herramienta.

Tabla 5. Herramienta ENVI-met

OBJETIVO	El propósito es simular la interacción entre superficies-plantas-aire en un entorno urbano, basado fundamentalmente en modelos de fluidodinámicos y termodinámica (Bruse, 2012).
METODO	Modelización 3D del espacio para obtener un amplio abanico de resultados sobre parámetros meteorológicos, calidad del aire y confort. Los datos de entrada sobre geometría y datos climáticos de partida pueden recopilarse fácilmente de estaciones meteorológicas cercanas.
MODELO DE CALCULO	Cálculo avanzado de la componente solar en áreas específicas analizando dos parámetros: el factor vista al cielo y radiación solar incidente y reflejada en el exterior. Los modelos 3D a simular pueden realizarse directamente en el programa a través del módulo de diseño o desde otros programas como AutoCAD, Revit o Sketchup.

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de Wong 2010

3 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y SELECCIÓN DE LA HERRAMIENTA

Como se observa en la descripción de los principales sistemas empleados para evaluar la condición del clima urbano, existen muchas semejanzas y diferencias entre las herramientas analizadas. La Tabla 6 presenta la comparativa entre propiedades y características destacadas en los sistemas analizados.

Tabla 6. Comparativa de herramientas

Herramienta	Transf. Radiancia	Transmisión calor	Geometría	Materiales
SunTool	Intercambio onda corta entre superficies para prevenir radiación incidente y reflejada	Intercambio de calor entre superficies y el aire	Apoya otros sistemas de representación 3D CAD, ArchiCad, Sketchup, Ecotec	Deducción de materiales por defecto o deducidos por el usuario
SOLENE	Calculo en modelo que simula claridad del cielo y dirección de radiación de onda directa y reflejada	Calcula el fluido de calor entre superficies y atmosfera	Permite la introducción y visualización de modelo 3D	Puede definir los materiales de envolventes en forma detallada
Rayman	Basado en modelo de transmisión de onda e intercambio radioactivo	No se considera	Introducción de geometría en 3D y visualización en 2D	No se considera
Ecotec	Modelo de radiación directa y reflejada. Permite exportar datos a otros modelos	Calcula de las aportaciones solares en la simulación de edificios	Introducción de geometría a través interfase grafica o importada de otros modelos	Indica materiales de las envolventes y superficies reflectantes
ENVImet	Simula la radiación directa, reflejada y emitida por el entorno urbano	Aplica modelo de transmisión de calos basado en ley Stefan-Boknan	Define un malla regular para introducir la geometría, se visualiza en 2D.	Indica solo materiales de suelos, pero no edificios.

Como se observa, la mayoría de herramientas coinciden con la utilización de modelos 3D para representar la estructura urbana y determinar el comportamiento energético, la radiación solar incidente y analizar los componentes del exterior. En la descripción de las herramientas se observa que las principales diferencias se presentan en los objetivos, métodos de cálculo y software seleccionado. Solo algunos modelos recientes se enfocan a la evaluación solar en los espacios urbanos, lo que demuestra que, a pesar del interés ambiental actual existe carencia de herramientas adecuadas para la planificación solar urbana.

Respecto a los aspectos energéticos intervinientes, dispersión y absorción de energía solar, existe cierta coincidencia en las metodologías aplicadas y consideración de factores tales como: geometría y orientación, distribución de edificios, tecnología constructiva y volumetría, al igual que los parámetros de relación parcela verde, factor de vista de cielo, densidad, superficies, pavimentos, albedo, y el sombreamiento entre edificios, ventilación y complejidad de las edificaciones.

La indagación evidencia que la mayoría de herramientas utilizan cálculos numéricos que contribuyen a la predicción de horas de sol en fachadas, zonas sombreadas y cambios edificatorios intervinientes en la captación solar. Por otra parte, muestra un alto nivel de complejidad ya que la realización de un modelo completo es bastante laboriosa y compleja por la cantidad de factores intervinientes. Sin embargo, la introducción del cálculo computacional ayuda a avanzar en los enfoques teóricos y experimentar modelos más complejos y cercanos a nuestra situación real de clima cálido-húmedo.

En definitiva, los resultados evidencian que las herramientas coinciden en cuanto a factores de radiación solar como sombreamiento, ventilación, obstrucciones solares, topografía, vientos dominantes, zonas verdes. También concuerdan con los parámetros de radiación solar, directa, difusa y reflejada en la evaluación del comportamiento térmico, lumínico y energético y determinación de los índices de eficiencia energética para orientar las estrategias de diseño y toma de decisiones sobre acondicionamiento pasivo o activo en las áreas exteriores urbanas.

3.1 Selección de la herramienta

Tomando en consideración los métodos descritos anteriormente y a fin de seleccionar la herramienta apropiada para evaluar el potencial solar local, se establecen algunos criterios acorde a los objetivos de investigación: simplicidad, flexibilidad y adaptabilidad a las condiciones locales, disponibilidad de recursos técnicos. Una vez analizados los sistemas de acuerdo a criterios establecidos, se propone el programa ECOTEC como alternativa que satisface el compromiso entre la dificultad de realización del modelo y la consecución de resultados considerando los recursos técnicos locales disponibles para la realización del estudio.

Por la fuerza de los instrumentos de análisis y su capacidad en el manejo de geometría compleja, ECOTECT es la plataforma elegida para analizar el potencial solar y consumo energético adaptado al clima tropical local. El programa facilita la transferencia de geometría y aumenta la velocidad de cálculo de ganancia solar por la simplicidad de entrada y capacidad de importar geometría, gráficos, y exportar resultados en 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 el software para el análisis de las cargas térmicas, flujo del aire, iluminación, sombras y reflexión, protecciones solares, radiación solar y acústica.

4 CONCLUSIONES

El tema analizado sobre aplicación de métodos y herramientas en experiencias prácticas de evaluación aplicadas a nivel internacional y latinoamericano (casos de estudio), conllevó a conocer y evaluar los procedimientos utilizados y orientó la selección de la herramienta adecuada para la evaluación del potencial solar en clima cálido-húmedo. La indagación realizada verifica la validez de los instrumentos aplicados en el análisis del comportamiento térmico-energético localizados en la estructura urbana. Esto comprueba la contribución de los cálculos computacionales en el procesamiento de gran volumen de información para obtención de los datos relativos al consumo energético, requisitos, condiciones climáticas, cálculo de confort y ganancia solar en los espacios exteriores de los desarrollos urbanos. El proceso de revisión de las herramientas seleccionadas destacó a ECOTEC como la plataforma más apropiada por sus ventajas técnicas en el análisis y retroalimentación de información y predicción de la condición energética del espacio. El sistema proporciona a los usuarios beneficios cuando se conocen los alcances y limitaciones en el uso del software. La utilización de equipos sencillos y posibilidad de acceso al programa de forma gratuita, son también elementos que influyen en la selección como herramienta de cálculo para el estudio solar en clima cálido-húmedo.
Tal como se observa, el estudio sobre energía solar es un tema extenso y complejo del cual solo se ha avanzado un aspecto parcial, por lo que es susceptible continuar desarrollando y complementando distintos procesos que convergen en el tema. A partir del análisis de métodos y herramientas han surgido una serie de inquietudes que consideramos deben ser analizadas para complementar el campo de aplicación del estudio. Actualmente la investigación avanza hacia el desarrollo de una metodología de evaluación y planificación solar en la microescala urbana, definición de técnicas y procedimientos aplicables en el aprovechamiento y captación de energía, uso eficiente y consumo de recursos y optimización solar en la microescala local.

5. REFERENCIAS

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

Bruse, M., Wania, A., Blond, N., Weber, C. (2012). Analyzing the influence of different street vegetation on traffic-induced particle dispersion using microscale simulations. **Journal of Environmental Management**, Vol. (94), pp. 91-101.

Caamaño, M., Higueras, E., Neila, J. (2011). ***Hacia un Urbanismo solar***. *Proyecto europeo POLIS Energías renovables 2010-2020*. Instituto de Energía Solar-Universidad Politécnica de Madrid. Extraído en agosto 2015. Disponible en: http:// www.polis-solar.eu

Compagnon, R. (2004). Solar and daylight availability in the urban fabric. **Energy and Buildings**. Vol. (36), pp. 321–338.

Cheng, V., Steemers, K., Montavon, M., Compagnon, R. (2006). Urban form, density and solar potential. PLEA 2006, pp. 6-18, Geneva, Switzerland.

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

Freitas, C., Catita, C., Redweik, P., Brito, M. (2014). **Modelling solar potential in the urban environment**: Reed Elsevier, Pennsylvania.

Gago, E., Roldan, J., Pacheco, R., Torres, J., Ordóñez, I. (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. Extraído en julio 2015. Disponible en: https://www.elsevier.com/locate/rser RenewableandSustainableEnergy

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

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. Doctorado en Ciencias meteorológicas. Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile, Santiago.

Higueras, E. (2012). La Ciudad Solar. Instituto Juan de Herrera. Escuela de Arquitectura de Madrid ETSAM. **Cuadernos de apoyo a la docencia**. Vol. (390), pp. 40.

Liu, Y., Song, Y., Arp, H. (2012). Examination of the relationship between urban form and urban eco-efficiency in China. **Hábitat International**. Vol. (36), pp.7-17.

Marsh, A. (2010). Thermal Modelling: The AUTODESK - ECOTEC *(*Version 5.6). Extraído en enero 2016. Disponible en: http://www.squ1.com

Matzarakis, A.; Rutz, F.; Mayer, H. (2007). Modeling Radiation Fluxes in Simple and Complex environments-application of the RayMan Model. **International Journal of Biometeorology**. Vol. (51), pp. 323-334.

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

POLIS Programa de Energía Inteligente Europa (IEE) (2001). Identificación y movilización del potencial solar mediante estrategias locales. Directrices basadas en las experiencias piloto de Lisboa, Lyon, Malmö, Múnich, París y Vitoria-Gasteiz. Documento en línea:
https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/sites/ieeprojects/files/projects/documents/polis_guidelines

Robinson, D. (2011). **Computer Modeling for Sustainable Urban Design: Physical Principles, Methods and Applications**. Earthscan Publications Ltd. London, Routledge Publisher, London and USA.

Sosa, M. (2011). Desarrollo de método paramétrico para determinar índices de eficiencia energética para fachadas en edificios con sistema de acondicionamiento activo. ***Revista***

Ambiente y Sostenibilidad. Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción (IDEC), Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad Central de Venezuela, pp.19.

Taha, H. (1997). Urban climates and hest islands: albedo, evapotranspiration and anthropogenic heat. **Energy and Buildings**. Vol. (25), pp. 99–103

Wong, N., Kwang, T. (2010). Thermal Evaluation of Vertical Greenery Systems for Building Walls. **Building and Environment**, Vol. 45, No. (3), p. 663-672.

Wong, N., Jusuf, S., Chen, Y., Sathyanarayanan, H., Manickavasagam, Y. (2011). Evaluation of the impact of the surrounding urban morphology on building energy consumption. **Solar and Energy**, Vol. (85), pp. 57–71