

ARTÍCULO - Tesis Premiadas Convocatoria de Premios RADE 2024

Diseño y aplicación de una metodología para el análisis del microclima de los espacios de transición

Design and application of a workflow for the analysis of transitional space microclimates

Victoria Patricia López Cabeza*

Departamento de Matemática Aplicada I, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad de Sevilla
vlopez7@us.es

RESUMEN

La presente comunicación resume el contenido de la tesis doctoral premiada en la categoría de ciencias experimentales y tecnológicas de los Premios RADE a la Investigación 2023. Esta investigación tiene como objetivo el diseño y validación de una metodología de simulación del microclima de los espacios exteriores a los edificios de manera que el efecto beneficioso que estos puedan ejercer se pueda tener en cuenta tanto en análisis de confort como en la simulación energética de edificios. Además, se hace uso de la metodología para el diseño de estrategias que mejoran el microclima de patios de edificios existentes. Esta comunicación resume los principales resultados aportados por esta investigación, sus conclusiones y futuras investigaciones.

PALABRAS CLAVE: Simulación, microclima, confort térmico exterior, diseño sostenible.

ABSTRACT

This communication summarizes the content of the doctoral thesis awarded in the Experimental and Technological Sciences category at the 2023 RADE Research Awards. The research aims to design and validate a methodology for simulating the microclimate of outdoor spaces adjacent to buildings. This methodology allows for the beneficial effects of these spaces to be accounted for in both comfort analysis and energy simulations of buildings. Additionally, the methodology is applied to the design of strategies that enhance the microclimate of courtyards in existing buildings. This communication presents the key findings, conclusions, and future research directions arising from this study.

KEYWORDS: Simulation, microclimate, outdoor thermal comfort, sustainable design

* La autora fue galardonada con el Premio Ciencias Experimentales y Tecnológicas en la Convocatoria de Premios RADE 2023 a la mejor tesis doctoral por su tesis *Diseño de una metodología de análisis del microclima de los espacios de transición: aplicación en el análisis de estrategias de mejora energética y confort en arquitecturas con patio del clima mediterráneo*.

1. INTRODUCCIÓN

El último informe del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático predice con alta confianza un aumento en las temperaturas globales de al menos 1.5°C por encima de los niveles preindustriales durante el siglo XXI si no se logra una reducción profunda de las emisiones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero en las próximas décadas [1]. Las temperaturas cada vez más altas también están empeorando el efecto de Isla de Calor Urbano en nuestras ciudades, lo que significa temperaturas más altas en áreas urbanas que en las áreas rurales circundantes. Este problema está amenazando nuestra forma de vida y se necesitan estrategias de mitigación y adaptación, especialmente en el diseño urbano, teniendo en cuenta que la geometría, los materiales de superficie y el rendimiento energético de los edificios están asociados con el efecto de isla de calor [2]. Considerando que los edificios son responsables del 36% de las emisiones de CO₂ en la Unión Europea [3], reducir la demanda energética de los edificios ayudará tanto a la mitigación del cambio climático como a la reducción del efecto de isla de calor en las ciudades, mejorando el confort exterior.

Las estrategias pasivas para reducir el consumo de energía de los edificios incluyen la generación de microclimas mediante la regulación de la radiación solar o el movimiento del aire, entre otras estrategias. Por ejemplo, el uso de patios interiores es común en muchas culturas de todo el mundo debido a su capacidad para mitigar las condiciones climáticas extremas en el exterior y mejorar el confort de los usuarios [4]. Dentro del patio, las diferencias de temperatura debido al auto sombreado o la presencia de vegetación o agua producen efectos termodinámicos que generan un microclima que puede ser beneficioso para mejorar el confort y reducir el consumo de energía en el edificio [5]. Sin embargo, el rendimiento de los patios depende de su diseño. Puede optimizarse teniendo en cuenta diferentes variables como la geometría, las propiedades de los materiales, los elementos de sombreado, la vegetación o el agua, aunque se requieren herramientas de simulación para predecir las complejas relaciones entre ellos.

La predicción del comportamiento de los edificios mediante simulación es una herramienta esencial en el desarrollo del proyecto en la actualidad. Sin embargo, todavía hay retos que deben considerarse en el proceso de simulación de los edificios para garantizar resultados precisos, siendo uno de los cuales la consideración de los beneficios potenciales de los microclimas circundantes al edificio en su rendimiento. Actualmente, los beneficios del efecto microclimático de los patios aún no se incluyen en las herramientas existentes de simulación de energía de los edificios [6]. Las principales razones son dos: el uso de diferentes microclimas exteriores no es una opción disponible en la mayoría de las herramientas (que solo consideran uno para toda la simulación) y que el microclima del patio es difícil de calcular, dada la multitud de factores y sus combinaciones que afectan ese microclima, como se describió anteriormente. Teniendo en cuenta, por lo tanto, la

complejidad del sistema, se necesita un enfoque de simulación numérica diferente, que incluya Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), para conseguir resultados precisos.

En este contexto, esta investigación tiene como objetivo diseñar y validar una nueva metodología de simulación aplicada al microclima de los patios para evaluar su rendimiento termodinámico considerando los diferentes factores involucrados. Utilizando esta nueva metodología, se analizan diferentes estrategias para mejorar el rendimiento del patio como elemento pasivo para reducir el consumo de energía de los edificios y mejorar el confort de los usuarios.

2. METODOLOGÍA

La metodología seguida en esta investigación combina un análisis crítico del estado del arte, el análisis experimental de casos de estudio y el desarrollo de resultados de simulación para alcanzar los objetivos expuestos en la sección de objetivos. El diseño de la novedosa metodología de análisis parte de un estudio de la literatura para la selección de las herramientas de simulación más adecuadas [7]. Tras el diseño de la metodología de simulación, es necesaria validarla, para lo cual son necesarios datos experimentales para compararlos con las simulaciones. Finalmente, la herramienta validada se aplica al análisis de casos y el diseño de estrategias de mejora de patios de edificios existentes.

2.1. Contexto y casos de estudio

La presente investigación se centra en el contexto del clima mediterráneo, en cuyas condiciones de calor extremo se aprecian en mayor medida las condiciones beneficiosas de los espacios como el patio. Este clima está definido como Csa según la clasificación de Köppen [8], lo que significa que los veranos son calurosos y secos con temperaturas que alcanzan más de 40°C, los inviernos son suaves y existe poca precipitación media a lo largo del año. Este clima es compartido por las dos ciudades donde se ubican la mayoría de los estudios de caso seleccionados: Sevilla (37°17'01"N 5°55'20"W, elevación 42 m sobre el nivel del mar) y Córdoba (4°46'21.9"W, 37°53'29.58N, elevación 106 m sobre el nivel del mar).

Los casos de estudio han sido seleccionados para campañas experimentales necesarias para validar y calibrar los procedimientos desarrollados en este trabajo (*Figura 1*). Los criterios de selección responden a dos ideas principales: representatividad de los casos seleccionados del entorno construido del área estudiada, y accesibilidad y flexibilidad para el análisis de los diferentes parámetros que están siendo analizados: geometría, albedo¹, sombreado, inercia térmica y vegetación.

¹ El albedo es la fracción de radiación solar que es reflejada por una superficie. Se mide entre 0 y 1.



Figura 1. Fotografía aérea de los casos de estudio seleccionados.

La geometría de los patios está definida por su Relación de Aspecto (AR), que es la relación entre su altura y anchura (ver ecuación 1), y el Factor de Visión del Cielo (SVF), que es la proporción del cielo que puede ser visto directamente desde un punto específico con respecto al cielo hemisférico completo que se vería sin ningún elemento que bloquee la vista.

$$AR = \frac{\text{Altura}}{\text{Anchura}} \quad (1)$$

$$SVF = \frac{\text{Fracción de cielo visible}}{\text{Hemisferio del cielo completo}} \quad (2)$$



Figura 2. El factor de visión del cielo es la proporción del cielo que puede ser visto directamente desde un punto específico respecto al cielo hemisférico completo. Esta imagen muestra un patio en la Real Fábrica de Tabacos de Sevilla. Fuente: Universidad de Sevilla [9].

2.2. Procedimiento experimental

Las campañas de monitorización de campo se llevaron a cabo durante los meses más calurosos del año, en un período mínimo de una semana hasta un mes en cada patio. Las variables registradas son la temperatura del aire, la humedad relativa y la velocidad y dirección del viento fuera del patio, utilizando estaciones meteorológicas PCE-FWS 20.

Dentro del patio, las variables registradas son la temperatura del aire y la humedad relativa en todos los casos, utilizando sensores TESTO 174H, y algunas de ellas incluyen la temperatura radiante media utilizando un termómetro de globo negro modelo QUESTemp° 34. La *Tabla 1* muestra la información técnica de los instrumentos de medición utilizados.

Tabla 1. Características técnicas de los instrumentos de monitorización.

Instrumento	Variable	Precisión	Resolución
TESTO 174H	Temperatura de bulbo seco	± 0.5 °C	0.1 °C
	Humedad relativa	$\pm 0.1\%$	2%
PCE-FWS 20	Temperatura de bulbo seco	± 1 °C	0.1°C
	Humedad relativa	$\pm 5\%$	1%
	Velocidad del viento	± 1 m/s	-
QUESTemp° 34	Temperatura de globo	± 0.5 °C	0.1°C

El procedimiento de monitorización sigue una metodología previamente determinada por el grupo de investigación TEP 206 y ya publicada en publicaciones previas [10]: la estación meteorológica está ubicada en la cubierta del edificio, separada del suelo para evitar el sobrecalentamiento, y los sensores en el patio se colocan a diferentes alturas desde el suelo, cerca de la pared sombreada del patio para evitar la radiación solar directa. Están protegidos por protectores abiertos y separados de la pared por al menos 10 cm. La *Figura 3* muestra algunos ejemplos del instrumento instalado en uno de los casos.

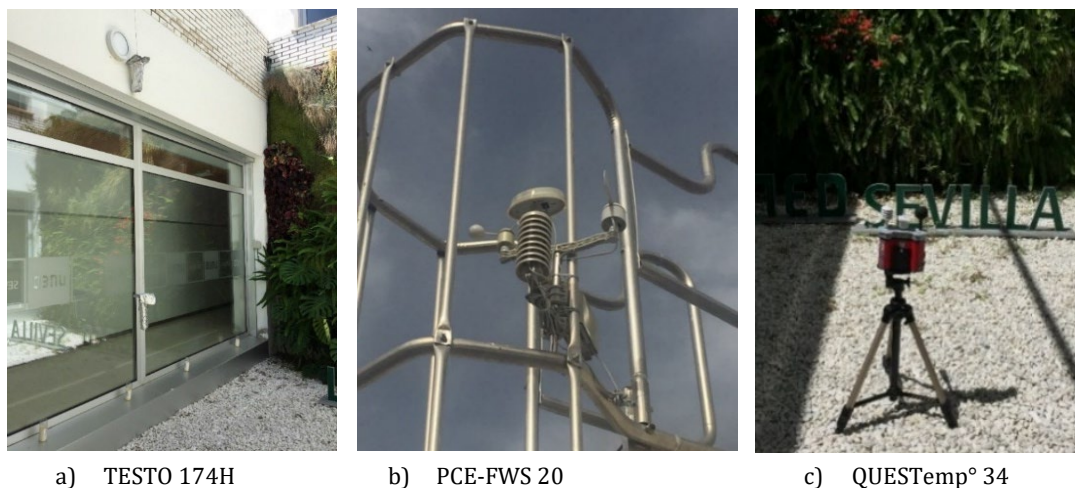


Figura 3. Instrumentos de medición instalados en el edificio.

2.3. Procedimiento de simulación

Las simulaciones numéricas realizadas en este trabajo se llevan a cabo utilizando dos programas de simulación existentes seleccionados tras una revisión de la literatura según las necesidades del análisis: son herramientas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)

que permiten el análisis de microclimas exteriores, incluyen análisis de confort térmico y están disponibles para los usuarios. Estas herramientas son ENVI-met y el conjunto de herramientas Ladybug Tools (LBT). Se han incorporado en una metodología de simulación innovadora que se explica en profundidad en investigaciones anteriores [11].

ENVI-met [12] es uno de los softwares de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) más ampliamente utilizado para simulaciones de microclima urbano a escala global. Además de considerar variables como radiación solar, viento, suelo y vegetación, utiliza la herramienta BioMet para calcular índices de confort y permite la definición de materiales según sus características térmicas, como el albedo y la emisividad, lo que lo hace adecuado para el análisis de la influencia de diferentes parámetros en el rendimiento termodinámico del patio y el confort de los usuarios. ENVI-met utiliza el método numérico de Diferencias Finitas para resolver la multitud de ecuaciones diferenciales parciales (EDP) y otros aspectos del modelo.

Las Herramientas Ladybug [13] son un conjunto de complementos de código abierto para Grasshopper que permiten la conexión entre diferentes softwares de simulación validados como EnergyPlus (simulación energética), OpenFOAM (simulación CFD) o Daysim (análisis de iluminación diurna) con la interfaz gráfica de usuario de la herramienta de modelado Rhinoceros. Es de código abierto, y una gran comunidad de investigadores y desarrolladores continúa actualizando sus componentes. Su flexibilidad e interoperabilidad lo hacen adecuado para el desarrollo de nuevos flujos de trabajo y procedimientos, permitiendo también el análisis paramétrico.

Para la validación de los resultados de las simulaciones, se utilizan parámetros estadísticos como el Coeficiente de Determinación (R^2), que indica cómo de cerca están los valores simulados de la línea de regresión de los valores medidos; el Error Cuadrático Medio (RMSE), el Error Cuadrático Medio Sistemático (RMSEs) y el Error Cuadrático Medio no Sistemático (RMSEu), que miden la variabilidad de los errores entre los valores medidos y simulados; y el Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE) [14]. Los valores deseados para estos índices deberían tender hacia $R^2 \rightarrow 1$, $RMSE \rightarrow 0$, $RMSEs \rightarrow 0$, $RMSEu \rightarrow RMSE$ y $MAPE \rightarrow 0$ [15].

No existen directrices específicas para la validación de simulaciones exteriores, por lo que la comparación con estudios anteriores y herramientas validadas será el criterio de validación. Otro criterio de validación del modelo que se utiliza es la Guía ASHRAE 14-2014 [16]. Aunque esta guía es para simulaciones energéticas en proyectos de conservación, las recomendaciones de precisión que proporciona deben considerarse para garantizar una buena fiabilidad: si se utilizan datos de calibración horaria (como en nuestro caso), el Error Medio de Sesgo Normalizado (NMBE) debe ser inferior al 10% y el Coeficiente de Variación del Error Cuadrático Medio (CV-RMSE) debe ser inferior al 30%. Además, se recomienda obtener un valor de R^2 superior a 0.75.

3. RESULTADOS

En este apartado se resumen los principales resultados de la investigación, divididos en tres secciones. La primera presenta los resultados del diseño y validación de la nueva metodología de simulación de los espacios de transición mediante la comparación con datos monitorizados. La segunda sección muestra resultados en relación a la aplicación de la metodología diseñada en el análisis de la efectividad de diferentes estrategias de mejora del microclima de los patios de edificios existentes. La tercera sección muestra resultados de la aplicación de la metodología de simulación del patio al utilizarla en un análisis integral del rendimiento de edificios.

3.1. Diseño y validación de la metodología de simulación

Este apartado presenta los resultados del proceso de validación de dos flujos de trabajo diferentes para la simulación del microclima exterior aplicado al caso específico de los patios interiores. El primero utiliza una herramienta existente conocida para la simulación del microclima urbano al aire libre (ENVI-met), mientras que el segundo utiliza un flujo de trabajo novedoso utilizando las Herramientas Ladybug, incluyendo el uso del complemento Butterfly [17] para cálculos de CFD con variaciones de temperatura. Ambos procedimientos fueran validados utilizando datos monitorizados en diferentes casos de estudio. La metodología empleada se encuentra diagramada en la *Figura 4* y se explica con más detalle en publicaciones anteriores [11,18].

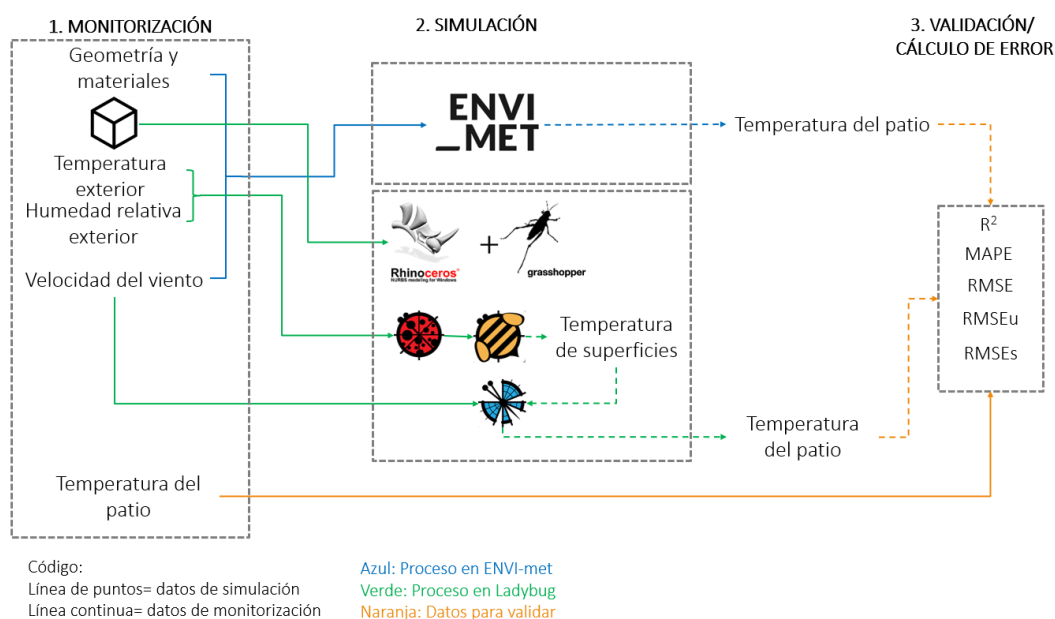


Figura 4. Diagrama de la metodología de simulación y validación para el análisis de espacios de transición.

Aunque los resultados de ambas metodologías se consideran válidos, las herramientas Ladybug fueron más precisas que ENVI-met, como puede observarse en la *Tabla 2*. Para explicar estas diferencias, dado que ambos métodos utilizan el mismo modelo de turbulencia RANS con la aproximación de Boussinesq, es necesario analizar otros aspectos del modelo de CFD, como las condiciones de contorno del modelo o la resolución de la malla:

- La malla generada en el modelo de Ladybug es más fina que en ENVI-met, lo que podría llevar a resultados más precisos. Esto se debe a que, en ENVI-met, el tamaño de la malla está limitado a un mínimo de 0.5 m, que generalmente es suficiente para simular grandes espacios urbanos, pero podría ser insuficiente para espacios más pequeños como los patios interiores.
- Las condiciones de contorno en ENVI-met se obtienen mediante un método simplificado para simular las temperaturas de los edificios que afectan las temperaturas superficiales en el patio interior. En las Herramientas Ladybug, las temperaturas superficiales en el patio se obtienen utilizando una simulación para todo el edificio en EnergyPlus, lo que puede producir resultados más precisos.

Tabla 2. Resultados de los parámetros estadísticos para la validación de las simulaciones.

		AR	R ²	MAPE (%)	RMSE (°C)	RMSEu (°C)	RMSEs (°C)
Simulación con ENVI-met	CS1	0.9	0.96	6.85	2.61	3.96	1.42
	CS2	1.5	0.92	8.74	3.46	5.54	2.20
	CS3	4.6	0.84	14.38	5.22	6.76	1.66
	CS4	2.1	0.89	10.08	4.19	6.21	2.24
Simulación con Ladybug	CS1	0.9	0.94	3.81	1.37	2.41	1.12
	CS2	1.5	0.73	5.07	2.00	2.41	0.96
	CS3	4.6	0.78	7.55	2.29	3.09	1.03
	CS4	2.1	0.89	7.18	2.59	4.39	1.93

Leyenda:

	Mejor resultado de cada parámetro entre los dos flujos de simulación.
	Peor resultado de cada parámetro entre los dos flujos de simulación.

A pesar de que Ladybug parece ser según esto la herramienta más adecuada para la simulación del microclima, tiene una gran limitación: aun no permite incorporar el efecto de enfriamiento evaporativo que produce la vegetación, aspecto que si es considerado por ENVI-met. Es por ello que, si el caso a estudiar tiene una presencia importante de vegetación, la herramienta a utilizar es necesariamente ENVI-met.

En ambos métodos, un aspecto interesante es que cuanto mayor es la Relación de Aspecto (AR), menor es la precisión de los resultados de la simulación. Esta correlación es relevante

considerando que, en cuanto a los resultados experimentales, cuanto más profundo es el patio, mayor es el efecto de amortiguación de condiciones extremas que produce. La razón podría ser que, en patios más profundos, el microclima está más influenciado por las condiciones internas del edificio que en patios menos profundos, que están más influenciados por las condiciones exteriores. Esto hace que una buena modelización de las propiedades de los materiales y las operaciones del edificio sea esencial para obtener mejores resultados.

3.2. Aplicación para el análisis de microclima de los patios

La metodología de simulación validada en el apartado anterior para analizar el microclima y el confort en patios interiores se ha utilizado para estudiar las mejoras térmicas de diferentes estrategias aplicadas a espacios de patio existentes en el clima mediterráneo. Se evalúa el efecto de la geometría [11], el albedo y la vegetación [19], dispositivos de sombreado [20], inercia térmica y ventilación de los patios interiores [21]. En función de las características de cada caso de estudio, es necesario usar ENVI-met o LBT. La *Figura 5* muestra los diferentes casos de estudio analizados para cada estrategia, junto con las variables analizadas.









	GEOMETRÍA	ALBEDO + VEGETACIÓN	SOMBREAMIENTO	VENTILACIÓN + INERCIA TÉRMICA
CASOS				
SOFTWARE	ENVI MET 	ENVI MET 		
VARIABLES	Relación de aspecto Galerías	Albedo de las superficies 3 niveles de albedo	Con sombra Sin sombra	3 niveles de inercia térmica Ventilado No ventilado
OUTPUTS	Temperatura del aire UTCI	Temperatura del aire Temperatura de superficies Temperatura media radiante PET	Temperatura del aire UTCI	Temperatura del aire Temperatura media radiante UTCI

Figura 5. Esquema de las estrategias analizadas en cada caso y las variables utilizadas.

Algunos de los principales hallazgos y recomendaciones derivadas son:

- Los patios más profundos logran un mayor efecto de atemperamiento del microclima exterior y un mejor confort térmico, dado que sus superficies están menos expuestas a la radiación solar directa y al entorno exterior. Aunque la geometría generalmente no es

modificable en edificios existentes, el flujo de trabajo de simulación ha sido evaluado y puede predecir la tendencia del rendimiento térmico según la geometría.

- La modificación del albedo de las paredes en un patio tiene poco efecto en la temperatura del aire (alrededor de 0.2°C de diferencia térmica). Sin embargo, la influencia en el confort térmico es alta (reduciendo hasta 5°C en el índice de confort PET²), dado que las temperaturas superficiales y las temperaturas radiantes medias dependen en gran medida del albedo. Se recomienda un albedo alto para las superficies del suelo y un albedo medio para las superficies de las paredes, para equilibrar los efectos positivos y negativos de las reflexiones de radiación.
- La instalación de un dispositivo de sombreado es la estrategia más efectiva según los datos experimentales (monitorizando hasta 13°C de diferencia térmica entre el patio y la temperatura exterior). El flujo de trabajo de simulación fue capaz de predecir los beneficios de esta estrategia, aunque subestimó su potencial.
- La masa térmica y la ventilación natural se estudiaron juntas. Una mayor masa térmica logró mejores resultados. La ventilación puede tener efectos contradictorios en el confort térmico, dependiendo de muchos otros parámetros. La combinación de ambas estrategias consiguió reducir la temperatura del patio hasta 1.6°C y 1.4°C en el índice de confort UTCI³. En general, se recomienda la ventilación nocturna para contrarrestar el sobrecalentamiento del patio durante la noche.

3.3. Aplicación en el análisis integral del edificio

La incorporación de la metodología de simulación del microclima de espacios exteriores en el análisis integral del rendimiento de edificios supone un reto ya que implica la vinculación de herramientas muy diferentes, como son las herramientas CFD y las herramientas de simulación de edificios, que tienen escalas temporales de simulación muy diferentes. Este apartado presenta una metodología para analizar los efectos del patio en el interior del edificio y proporciona un método de acoplamiento para combinar la herramienta energética HULC⁴ y el flujo de trabajo de Ladybug diseñado previamente.

La Figura 6 esquematiza el proceso de acoplamiento entre LBT y HULC en la interfaz de Grasshopper. Este proceso ha sido diseñado con la idea de reducir al máximo la necesidad de cambiar de una interfaz de software a otra, pudiendo realizar la mayor parte de la simulación directamente desde la interfaz de Grasshopper. La parte más compleja fue la

² La temperatura equivalente fisiológica (PET, por sus siglas en inglés), es un índice de confort térmico muy utilizado para el análisis de confort en espacios exteriores [22].

³ El índice de confort térmico universal (UTCI por sus siglas en inglés) es un índice de confort muy usado en espacios exteriores debido a su consideración de universal para la que fue creado, es decir, es aplicable a cualquier clima [23].

⁴ La herramienta de certificación energética LIDER-CALENER (HULC) es la herramienta oficial proporcionada por el estado para la certificación de edificios en España.

comunicación entre los dos softwares en relación con la geometría del caso de estudio, que tuvo que ser modelada en Rhinoceros y exportada a HULC. Para lograrlo, se escribieron varios bloques de código en componentes Python en Grasshopper.

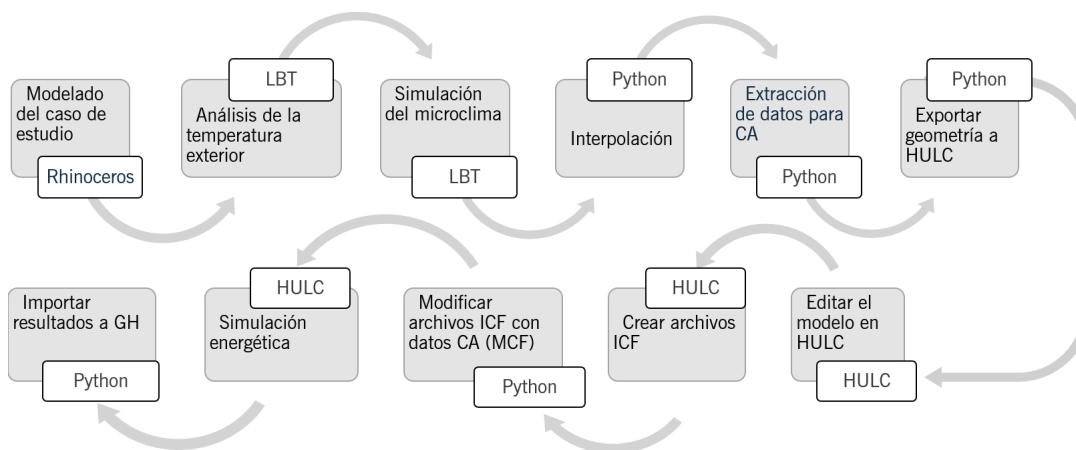


Figura 6. Metodología de acoplamiento de simulación energética y del microclima en GH.

A pesar del número de pasos mostrados, la mayoría de ellos se controlan en la interfaz de Rhinoceros/Grasshopper, por lo que el proceso es bastante sencillo. Los únicos pasos que ocurren fuera de esa interfaz son aquellos marcados como "HULC" en el proceso de la figura. El proceso es el siguiente:

- La geometría del edificio se modela utilizando el software CAD Rhinoceros y se importa a Grasshopper (GH) usando algunos componentes LBT. También es posible modelar directamente usando GH, especialmente para análisis paramétricos. Se admiten sólidos o superficies poligonales, que representan los espacios de manera simplificada, siguiendo las reglas del análisis LBT.
- El primer paso antes de la simulación del microclima del patio es el análisis del archivo meteorológico. Esto se hace para encontrar las temperaturas máximas y mínimas al aire libre y cuándo ocurren. Estas dos horas al día se seleccionarán para realizar la simulación CFD exterior, con el fin de acelerar el tiempo de simulación del CFD. El resto de las horas se interpolarán.
- La simulación CFD del microclima se realiza utilizando el flujo de trabajo LBT descrito en apartados anteriores.
- Se escribe un código Python para interpolar los resultados en las temperaturas máximas y mínimas entre las diferentes horas del día dado que el software HULC necesita datos por hora.
- Mientras que la herramienta HULC requiere un dato por hora y por superficie del edificio como condiciones límite, la simulación CFD de LBT proporciona resultados en múltiples puntos del espacio. Un código en Python extrae esa información de las simulaciones CFD

y almacena la información en el formato apropiado para copiarla más tarde en los archivos de capacidades adicionales de HULC (CA).

- La parte más compleja del flujo de trabajo es exportar la geometría desde Rhinoceros a HULC. Cada software tiene su propio lenguaje para definir el modelo, por lo tanto, se creó un código en Python para leer la geometría en Rhinoceros y traducirla al lenguaje de HULC. En esta etapa, el código solo exporta la geometría. Las propiedades de los materiales de las construcciones aún deben definirse en la interfaz de HULC. Sin embargo, esto es algo que podría agregarse en el futuro. En este momento, los cambios en la construcción del edificio, las aperturas, los sistemas y la ubicación del estudio de caso deben definirse en HULC.
- Una vez que se completa el modelo, se generan los archivos de CA en HULC. Se selecciona cada una de las superficies del edificio que va a tener sus condiciones de contorno modificadas y se genera un Archivo de Condiciones Iniciales (ICF). Este archivo contiene información sobre la superficie, incluidas las condiciones de contorno exteriores como radiación o temperatura del aire.
- Los archivos ICF deben modificarse con los datos de temperatura simulados con LBT y ya almacenados en GH. Esto se realiza automáticamente a través de un fragmento de código en Python que crea los Archivos de Condiciones Modificados (MCF).
- Los archivos MCF se importan a HULC y se ejecuta la simulación energética.
- Toda la información generada por HULC puede importarse a la interfaz de GH utilizando código Python para ser representada y analizada utilizando LBT.

La aplicación de la metodología anterior mostró que la inclusión del efecto del microclima de un patio en una casa bajo temperaturas extremas aportaba diferencias importantes a si no se considera, alcanzando el efecto del patio a reducir la temperatura interior en hasta 1.5°C en modo de oscilación libre. Las diferencias en la transmisión de energía a través de algunos elementos pueden llegar al 43%. Este trabajo es una prueba de concepto y la metodología aún necesita ser refinada, pero es un claro indicador de la necesidad del acoplamiento CFD-BES para lograr simulaciones más precisas.

4. CONCLUSIONES

Esta investigación propone una novedosa metodología de simulación aplicada al microclima de los patios para comprender su rendimiento termodinámico teniendo en cuenta los diferentes factores involucrados. Esta metodología se aplica al análisis de diferentes estrategias para mejorar el rendimiento del patio como elemento pasivo para reducir el consumo de energía de los edificios y aumentar la comodidad de los usuarios.

Se han seleccionado dos herramientas para aplicar en este estudio: ENVI-met como una herramienta existente y ampliamente utilizada para microclimas urbanos que no estaba lo suficientemente validada para su aplicación en patios, y LBT, una nueva herramienta híbrida que requería un nuevo diseño de script para implementar la simulación CFD con un algoritmo de transferencia de calor en patios.

La metodología propuesta utilizando LBT ha sido validada y cumple con las necesidades de la etapa de diseño inicial de proyectos con algunas ventajas sobre otras herramientas existentes como ENVI-met, como precisión, flexibilidad en la simulación y velocidad. Sin embargo, ENVI-met sigue siendo necesario si existe vegetación o estanques de agua en el caso de estudio, dado que es el único software capaz de incorporar sus efectos evaporativos en las simulaciones. Este software también se vincula a LBT para gestionar todas las herramientas en una sola interfaz. El análisis de validación de ambas herramientas proporcionó un RMSE entre 1,5°C y 3,4°C para ENVI-met y entre 1,4°C y 2,3°C para LBT, ambos considerados validados para el análisis de patios.

La aplicación de esta metodología ha demostrado numéricamente la eficacia de varias estrategias para mejorar el rendimiento del patio. La inclusión de dispositivos de sombreado tuvo la mayor influencia en la temperatura del aire (monitorizando hasta 13°C de diferencia térmica). Por otro lado, el albedo tuvo menos efecto en la temperatura del aire, pero tuvo una influencia importante en el confort de los usuarios, principalmente debido a su implicación en la temperatura de la superficie y, por lo tanto, en la temperatura radiante media. Se constató que la inercia térmica y la ventilación nocturna mejoraron el rendimiento del patio hasta 1.6°C y 1.4°C en el índice de confort UTCI. La metodología propuesta utilizando LBT y ENVI-met se puede utilizar para analizar todas estas estrategias tanto en el patio como en el espacio exterior, una posible futura vía de aplicación de los resultados de esta tesis doctoral.

En la aplicación de la metodología al análisis integral del edificio, se consigue aumentar el confort adaptativo en interiores y exteriores en una vivienda con patio utilizando la metodología propuesta. Las diferentes características de los enfoques de simulación BES y CFD dificultan su acoplamiento para una simulación prolongada. Para analizar la influencia del patio en la demanda energética durante un período más largo que unas pocas horas, el acoplamiento de LBT y HULC (herramienta oficial de certificación energética en España) incluye un código de interpolación para extraer datos horarios de dos simulaciones en estado estacionario utilizando la metodología propuesta en LBT y utilizar los resultados como condiciones límite para las superficies del patio en HULC. De esta manera, se ha podido analizar hasta un mes en un tiempo de simulación razonable.

Esta investigación tiene como objetivo contribuir al campo de la simulación de edificios y ciudades, considerando estrategias para mitigar y adaptarse a las crecientes temperaturas

en el futuro esperado del cambio climático. Proporciona las herramientas que arquitectos, diseñadores y urbanistas necesitan para abordar este desafío, así como recomendaciones para comprender la termodinámica urbana.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. IPCC, Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 2021.
2. M. SANTAMOURIS, N. PAPANIKOLAOU, I. LIVADA, I. KORONAKIS, C. GEORGAKIS, A. ARGIRIOU, D.N. ASSIMAKOPOULOS, On the impact of urban climate on the energy consumption of building, *Solar Energy* 70 (2001) 201–216. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00095-5](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00095-5).
3. In focus: Energy efficiency in buildings | European Commission, Brussels, 2020. https://ec.europa.eu/info/news/focus-energy-efficiency-buildings-2020-feb-17_en (accessed June 30, 2020).
4. Z. ZAMANI, S. HEIDARI, P. HANACHI, Reviewing the thermal and microclimatic function of courtyards, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 93 (2018) 580–595. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.055>.
5. J.M. ROJAS, C. GALÁN-MARÍN, E.D. FERNÁNDEZ-NIETO, Parametric study of thermodynamics in the mediterranean courtyard as a tool for the design of eco-efficient buildings, *Energies (Basel)* 5 (2012) 2381–2403. <https://doi.org/10.3390/en5072381>.
6. J. LIZANA, V.P. L, R. RENALDI, E. DIZ-MELLADO, C. RIVERA-G, C. GAL, Integrating courtyard microclimate in building performance simulation to mitigate extreme urban heat impacts, *Sustain Cities Soc* (2021) 103590. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103590>.
7. V.P. LÓPEZ-CABEZA, J. LIZANA, E. DIZ-MELLADO, C. RIVERA-GÓMEZ, C. GALÁN-MARÍN, Outdoor Microclimate Influence on Building Performance: Simulation Tools, Challenges, and Opportunities, in: D. Bienvenido-Huertas, J. Moyano-Campos (Eds.), *New Technologies in Building and Construction*, Springer, 2022: pp. 103–121. https://doi.org/10.1007/978-981-19-1894-0_7.
8. B.R. AND F.R. MARKUS KOTTEK, JÜRGEN GRIESER, CHRISTOPH BECK, World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated, *Sustainable Buildings & Climate Initiative* 15 (2009) 62. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>.
9. UNIVERSIDAD DE SEVILLA, Courtyard in the Royal Tobacco Factory of Seville, Twitter (2022). <https://twitter.com/unisevilla/status/1589535237591425024?t=sOd78v70dYZOwIHCbntnyg&s=19> (accessed December 7, 2022).
10. J. ROJAS-FERNÁNDEZ, C. GALÁN-MARÍN, J. ROA-FERNÁNDEZ, C. RIVERA-GÓMEZ, Correlations between GIS-based urban building densification analysis and climate guidelines for Mediterranean courtyards, *Sustainability (Switzerland)* 9 (2017) 2255. <https://doi.org/10.3390/su9122255>.

11. V.P. LÓPEZ-CABEZA, E. DIZ-MELLADO, C. RIVERA-GÓMEZ, C. GALÁN-MARÍN, H.W. SAMUELSON, Thermal comfort modelling and empirical validation of predicted air temperature in hot-summer Mediterranean courtyards, *J Build Perform Simul* 15 (2022) 39–61. <https://doi.org/10.1080/19401493.2021.2001571>.
12. ENVI-met, (n.d.). <https://www.envi-met.com/> (accessed October 28, 2019).
13. LADYBUG TOOLS | Home Page, (n.d.). <https://www.ladybug.tools/> (accessed March 13, 2024).
14. J.S. ARMSTRONG, F. COLLOPY, Error measures for generalizing about forecasting methods: Empirical comparisons, *Int J Forecast* 8 (1992) 69–80. [https://doi.org/10.1016/0169-2070\(92\)90008-W](https://doi.org/10.1016/0169-2070(92)90008-W).
15. C.J. WILLMOTT, Some Comments on the Evaluation of Model Performance, *Bull Am Meteorol Soc* 63 (1982) 1309–1313. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1982\)063<1309:SCOTEO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1982)063<1309:SCOTEO>2.0.CO;2).
16. ASHRAE, ASHRAE Guideline 14-2014. Measurement of Energy, Demand, and Water Savings, 2014. <https://energywatch-inc.com/ashrae-guideline-14/>.
17. LADYBUG TOOLS | Butterfly, (n.d.). <https://www.ladybug.tools/butterfly.html> (accessed September 27, 2020).
18. V.P. LÓPEZ-CABEZA, C. GALÁN-MARÍN, C. RIVERA-GÓMEZ, J. ROA-FERNÁNDEZ, Courtyard microclimate ENVI-met outputs deviation from the experimental data, *Build Environ* 144 (2018) 129–141. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.08.013>.
19. V.P. LOPEZ-CABEZA, S. ALZATE-GAVIRIA, E. DIZ-MELLADO, C. RIVERA-GOMEZ, C. GALAN-MARIN, Albedo influence on the microclimate and thermal comfort of courtyards under Mediterranean hot summer climate conditions, *Sustain Cities Soc* 81 (2022) 103872. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103872>.
20. V.P. LÓPEZ-CABEZA, E. DIZ-MELLADO, C.A. RIVERA-GÓMEZ, C. GALÁN-MARÍN, Shade and Thermal Comfort in Courtyards: Experimental Versus Simulation Results, *Buildings* 12 (2022) 1961. <https://doi.org/10.3390/buildings12111961>.
21. V.P. LÓPEZ-CABEZA, C. RIVERA-GÓMEZ, J. ROA-FERNÁNDEZ, M. HERNANDEZ-VALENCIA, R. HERRERA-LIMONES, Effect of thermal inertia and natural ventilation on user comfort in courtyards under warm summer conditions, *Build Environ* 228 (2023) 109812. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109812>.
22. P. HÖPPE, The physiological equivalent temperature - A universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment, *Int J Biometeorol* 43 (1999) 71–75. <https://doi.org/10.1007/s004840050118>.
23. G. JENDRITZKY, G. HAVENITH, P. WEIHS, E. BATCHVAROVA, R. DEDEAR, The Universal Thermal Climate Index UTCI Goal and State of COST Action 730, in: *International Scientific Conference, Poana nad Detvou, Slovakia, 2007*: pp. 509–512.