



Modelación de la transferencia de calor y masa de muros vegetativos y validación en condiciones de clima semiárido

Modeling of the heat and mass transfer of living walls and validation under semiarid climate conditions

Mauricio García (Autor principal)

Filiación: CEDEUS, Pontificia Universidad Católica de Chile
Dirección: Av. Vicuña Mackena 4860, Macul, Santiago. CP: 7820436
Correo: magarcia2@uc.cl

Sergio Vera

Filiación: CEDEUS, Pontificia Universidad Católica de Chile
Dirección: Av. Vicuña Mackena 4860, Macul, Santiago. CP: 7820436
Correo: svera@ing.puc.cl

Fabien Rouault

Filiación: Pontificia Universidad Católica de Chile
Dirección: Av. Vicuña Mackena 4860, Macul, Santiago. CP: 7820436
Correo: frouault@uc.cl

Waldo Bustamante

Filiación: CEDEUS, Pontificia Universidad Católica de Chile
Dirección: Av. Vicuña Mackena 4860, Macul, Santiago. CP: 7820436
Correo: wbustamante@uc.cl

Manuscript Code: 051

Date of Acceptance/Reception: 27-09-2018/24-08-2018

Abstract

The high demand of energy for air conditioning of buildings makes necessary the development of technologies that mitigate its excessive consumption. The living walls represent a technology that needs to be evaluated. However, currently there is no a simulation tool validated in semiarid climate conditions (Santiago) and implemented in a building performance simulation software that models the complex exchanges of mass and energy of a living wall, which does not allow the designers to properly take decisions during the early design stage of buildings. Therefore, the objective of this research is the development of this tool in order to evaluate the influence of living walls on the sensible thermal loads of buildings. The methodology includes three stages: (1) schematizing the biophysical processes of interest to be modeled; (2) formulating the model of heat and mass transfer for living walls; (3) validating experimentally the numerical model. The results show that the main difference between modelling green roof and living walls corresponds to the convective heat transport and the absorption of short wave radiation of the substrate, so that the relevant adaptations of a green roof model are carried out. The experimental validation shows a good agreement between the simulated and measured temperatures for the canopy and substrate of the tested living wall. The root mean square deviation (RMSD) of substrate temperature vary between 1.9 and 2.5 °C for the months studied, which correspond to March, July, August, October and November 2017, and January 2018. Therefore, the main contribution of this research was the development of a validated heat and mass transfer numerical model of living walls for semiarid climates, which is capable of representing all the processes of mass and energy exchange of living walls and calculate the temperatures of both the foliage and the substrate.

Keywords: Living walls; Heat and mass transfer; Energy performance of buildings.

Introducción

El desarrollo de la construcción de edificios en las grandes ciudades trae problemas de suministro de energía en función de sus necesidades. En cuanto al uso de la energía de los edificios en Chile, la mayor parte corresponde a los sistemas de climatización, en donde se alcanzan valores entre el 40 y el 65% del consumo total de energía de los edificios, según la Asociación Chilena de Eficiencia Energética (2016). Los muros vegetales surgen como una tecnología para mitigar el excesivo consumo energético de las edificaciones, en especial el uso de energía destinado a climatización. Sin embargo, para poder evaluar su impacto en el desempeño energético de los edificios, es necesario desarrollar una herramienta capaz de simular los intercambios de masa y energía que acontecen tanto en el mismo muro vegetal como en su interacción con el ambiente exterior. De esta manera, se puede calcular de forma numérica la temperatura de las plantas y, principalmente, la del sustrato, las que afectan las ganancias y pérdidas de calor a través del muro con vegetación, y que influyen en los consumos de energía de climatización de los edificios. Esto surge debido a que,

actualmente, ninguno de los modelos de muros vegetales existentes se encuentra validados para clima semiárido y, por otro lado, tampoco han sido implementados en un software de simulación energética que permita a los usuarios tener una amplia gama de opciones de diseño de este tipo de tecnologías y estudiar su influencia en el desempeño energético de los edificios.

La relevancia del desarrollo del modelo numérico de transferencia de calor y masa para muros vegetales consiste en la elaboración de una herramienta que sea capaz de calcular la temperatura del sustrato en todas sus capas, cuyo valor de mayor importancia corresponde a la temperatura de la última capa, ya que representará la condición de borde exterior del muro del edificio. De esta manera, se podrá estudiar la influencia de un muro vegetal en la temperatura exterior del muro del edificio al acoplar este modelo con una herramienta de simulación energética que permita calcular la temperatura al interior del edificio y analizar su impacto en las cargas térmicas y, por ende, en el desempeño energético de los edificios. Finalmente, también se busca crear una interfaz amigable al usuario, que permita a este evaluar diferentes condiciones y parámetros de diseño de los muros vegetales.

De esta manera, el objetivo principal de esta investigación consiste en desarrollar un modelo numérico de la transferencia de calor y masa de los muros vegetativos, además de la validación experimental del modelo desarrollado en condiciones de clima semiárido.

Estado del arte del problema

Actualmente, hay autores que han trabajado en la caracterización de los procesos biofísicos que ocurren en las cubiertas vegetales, tales como: radiación solar, radiación de onda larga, evapotranspiración, convección y conducción. En específico, existen modelos numéricos en los cuales, mediante ecuaciones, se estudian los balances de energía del sistema. Dentro de los modelos desarrollados para estudiar los muros vegetales, se encuentra el realizado por Malys et al. (2014), quienes elaboraron un modelo hidrotérmico que luego fue incluido en un software de simulación de microclimas llamado SOLENE-microclimates. En dicho modelo, se realiza un balance general de masa y energía, en donde incluyen los fenómenos de radiación, evapotranspiración y calor sensible. Sus resultados fueron la obtención de buenas representaciones de las temperaturas tanto del follaje como del sustrato. Sin embargo, el modelo no logra representar bien los procesos de evapotranspiración, argumentando que tiene deficiencias en modelar ciertos aspectos relacionados a las plantas.

Otro modelo, esta vez desarrollado por Scarpa et al. (2016), fue realizado con objeto de predecir el comportamiento térmico de muros vegetales en clima mediterráneo, en Italia. Sus resultados muestran una buena estimación de las temperaturas y los flujos de calor involucrados en el sistema. El modelo más actual fue desarrollado por He et al. (2017), el cual fue elaborado para evaluar el rendimiento energético de edificios ubicados en Shangai (China), ciudad que posee un clima templado. Sus resultados muestran buenas estimaciones de las variaciones de temperatura y humedad. A pesar de los correctos resultados simulados, los autores indican algunos problemas del modelo, como la falta de incorporación de los procesos de absorción de agua del sustrato por parte de las raíces de las plantas.

Ahora bien, a pesar de que existen modelos de transporte de calor y masa que poseen buenos resultados en cuanto al cálculo de las propiedades de interés, ninguno ha sido validado experimentalmente en las condiciones de clima semiárido (Santiago). Por otra parte, ninguno ha sido incorporado a una herramienta de simulación para investigar su impacto en el desempeño energético de las edificaciones.

Metodología

La metodología a llevar a cabo consiste en tres etapas, cada una de las etapas tiene un objetivo específico que cumplir, de forma que en su conjunto logren responder al objetivo general de este estudio, que corresponde al desarrollo de una herramienta capaz de simular los intercambios de masa y energía, la que permita poder calcular de forma numérica tanto la temperatura de las plantas como la del sustrato de los muros vegetativos. Las etapas junto con sus respectivos objetivos se pueden apreciar en Tabla 1 y que se describen a continuación.

Etapa I

Esta etapa se compone de una revisión bibliográfica la cual corresponde principalmente a la revisión de artículos científicos relacionados a la teoría de los procesos de transferencia de calor y masa. Se considera especial foco en los fenómenos de transporte, el clima y la biofísica ambiental. Lo anterior va de la mano con la revisión de literatura

relacionada a modelos numéricos de transferencia de calor y/o masa tanto de techos como muros vegetales. Luego, se realiza una esquematización de los procesos biofísicos. En cuanto a los modelos revisados, en este método el enfoque está en lo que compete a la modelación de los procesos de interés del muro y techo vegetal sobre la envolvente de un edificio, que corresponden a la absorción de radiación de onda corta, radiación de onda larga, evapotranspiración, transporte de calor por convección y conducción. Finalmente, se realiza una comparación de los modelos numéricos de muros y techos vegetativos. Se busca esquematizar ambos tipos de modelos, muros y techos, en cuanto a sus principales componentes de interés para la modelación mencionadas en el punto anterior, dado que son los conceptos de mayor influencia sobre la envolvente.

Tabla 1. Etapas de la metodología. Preparada por los autores, 2018.

Etapa de metodología	Objetivo específico
Etapa I	Esquematizar los procesos biofísicos que forman parte tanto de los sistemas de techos como de muros vegetales, de tal forma de establecer la diferencia entre ambos casos
Etapa II	Formular un modelo de muros vegetales a partir de un modelo realizado para techos vegetales por Tabares et al. (2012).
Etapa III	Validar el modelo para muros vegetales desarrollado a partir de la adaptación de modelo de Tabares, con datos experimentales de laboratorio para muros vegetales

Etapa II

En esta etapa se estudia un modelo de techos vegetales Tabares et al. (2012). Este modelo se encuentra validado para las condiciones climáticas semiáridas e implementado en el software Matlab lo cual fue desarrollado por Pinto (2017). Esto busca comprender su operación e implementación en este software de programación. Luego de comprender la operación del modelo, el siguiente paso consiste en mejorar la forma de su implementación, de tal manera de hacer más fácil su aplicación y también su rendimiento al momento de usarlo. Esto, enmarcado en poder obtener la mayor eficiencia de las funcionalidades del software Matlab. Posteriormente, se lleva a cabo la adaptación de ciertos procesos biofísicos y de transporte de calor, los cuales son distintos para el caso de los muros vegetales, de tal forma de desarrollar un modelo capaz de representar las principales variables de interés, como las temperaturas del follaje y sustrato y el contenido de humedad de este último para un muro vegetal.

Etapa III

En esta etapa se lleva a cabo el monitoreo experimental de un muro vegetal en Laboratorio de Infraestructura Vegetal de Edificios (LIVE). En LIVE se adquieren datos en tiempo real para el muro vegetal mostrado en la Figura 1, tales como condiciones de temperatura y/o humedad del follaje y sustrato, como también las condiciones climáticas de interés para el modelo, como la temperatura del aire, viento (velocidad y dirección), radiación solar (directa y difusa) y radiación de onda larga. Algunos de estos datos son datos de entrada del modelo mientras que otros corresponden a los datos que se utilizarán para la validación. Se emplea el modelo para calcular las temperaturas del follaje y sustrato, de tal forma de comparar con los valores medidos en laboratorio en diferentes estaciones del año. Se utilizan dos criterios para la validación. El primero, corresponde al gráfico de dispersión, el cual corresponde al gráfico de la temperatura modelada versus la medida, tanto del follaje como de sustrato, en el cual se puede apreciar la distribución de los valores modelados respecto de los medidos y la tendencia de los resultados. El segundo criterio corresponde al cálculo de la desviación cuadrática media (RMSD, por sus siglas en inglés) de acuerdo a Ec. 1.

$$\text{RMSD} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{\text{modelado}} - x_{\text{medido}})^2}{n}} \quad (1)$$

Esta medida representa el promedio de las diferencias entre los valores medidos y modelados. Sus unidades son grados Celsius. Sirve para saber, en promedio, qué tan cercanos están los valores simulados respecto a los medidos experimentalmente.

Las simulaciones en el software Matlab para la validación del modelo se realizaron para datos experimentales de distintas épocas a lo largo del año. De esta manera, los intervalos de tiempo simulados para el 2017 corresponden, del 13 al 30 de julio, del 31 de julio al 30 de agosto, del 29 de septiembre al 30 de octubre. Mientras que para el 2018, se realizó una simulación entre el 19 y 29 de enero. Estas simulaciones entregan como output la temperatura del follaje y del sustrato del muro vegetal para intervalos de tiempo de 5 minutos.



Figura 1. Muro vegetal de macetas, laboratorio LIVE. Fuente: propia, 2018.

Resultados

Adaptación de modelo de techos a muros vegetales

Como resultado del estudio del modelo de Tabares et. al (2012), se determinó que las principales diferencias entre los procesos de transferencia de calor y masa para el caso de un techo en comparación a un muro vegetal, radican en el transporte de calor convectivo y la absorción de radiación de onda corta. Esto ocurre debido a que el modelo de techos vegetales basa el cálculo numérico del flujo convectivo entre el ambiente exterior y el techo vegetativo bajo el supuesto de que este último corresponde a una placa horizontal. Por ello, se modifica el cálculo del número adimensional de Nusselt (Nu) por el obtenido en un experimento realizado para placas verticales por Churchill (1977), en donde calcula Nu para los casos de convección forzada, así como convección natural para la tasa local de transferencia de calor, cuyas expresiones son:

$$Nu_{xF} = \frac{0,339Re^{1/2}Pr^{1/3}}{\left(1 + 2\left(\frac{0,0468}{Pr}\right)^{2/3}\right)^{1/4}} \quad \text{convección forzada (2)}$$

$$Nu_{xN} = \frac{0,503Ra^{1/4}}{\left(1 + \left(\frac{0,0492}{Pr}\right)^{9/16}\right)^{4/9}} \quad \text{convección natural (3)}$$

$$Nu^n = Nu_F^n + Nu_N^n \quad \text{convección mixta (4)}$$

Donde Re y Pr corresponden a los números adimensionales de Reynolds y Prandl, respectivamente. El factor n presente en la ecuación de convección mixta depende del tipo de superficie. Para placas verticales planas, el valor más aceptado, según los estudios experimentales de Churchill (1977), es de $n = 3$. Por otra parte, los rangos de número adimensional de Grashof (Gr) respecto a Re según los que se produce cada tipo de convección son distintos también. En base a los estudios de Chen et al. (1986b), el límite para los tres tipos de convección para placas verticales corresponde a:

$$Gr_x < 0,07Re_x^2 \quad \text{rango convección forzada (5)}$$

$$7,5Re_x^2 < Gr_x \quad \text{rango convección natural (6)}$$

$$0,07 < Gr_x/Re_x^2 < 7,5 \quad \text{rango convección mixta (7)}$$

Por otra parte, se tiene que la radiación solar incide de forma prácticamente nula sobre el sustrato, debido a la cobertura del follaje y por la posición vertical de este. En consecuencia, se asume que la radiación solar absorbida por el sustrato es igual a cero.

$$R_{sh,abs,sub} = \tau_{plants,solar}(1 - \rho_{substrate})R_{sh} = 0 \quad (8)$$

Todos estos cambios son aplicados sobre las ecuaciones planteadas por Tabares et. al (2012), de forma de representar los balances de energía para las condiciones de un muro vegetal.

Validación experimental de la temperatura del follaje

En las Figuras 2 y 3 se pueden apreciar los resultados de las simulaciones realizadas para la temperatura del follaje. La Figura 2 muestra los datos para los meses cálidos (octubre de 2017 y enero de 2018), mientras que la Figura 3 corresponde a los meses fríos (julio y agosto de 2017). Se logra ver claramente una mejor correlación entre las temperatura simuladas y experimentales para los meses más cálidos en comparación a los meses más fríos. Estas diferencias para las temporadas de invierno y verano se pueden explicar, en parte, debido a que la radiación solar que incide directamente a las plantas disminuye en los meses de invierno, esto debido a la presencia de mayor cantidad de días nublados. La radiación posee un efecto en la apertura de los estomas, de tal forma que la planta tenderá a transpirar menos en invierno y a acumular más energía. Este hecho puede no estar siendo representado de forma suficientemente precisa en el modelo, lo que genera variaciones mayores en los resultados con respecto a las mediciones.

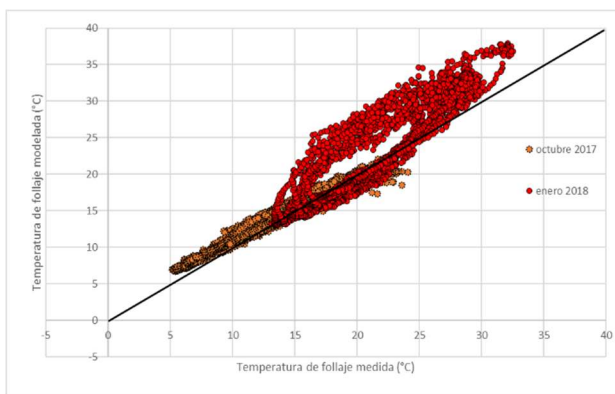


Figura 1. Correlación de resultados para temperatura del follaje en meses cálidos.

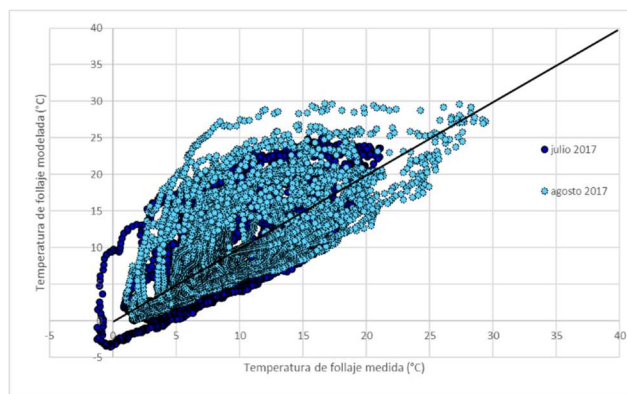


Figura 3. Correlación de resultados para temperatura del follaje en meses fríos.

Al analizar la comparativa entre las temperaturas simuladas versus las medidas para todos los meses estudiados, es posible notar que hay algunos meses con mejores resultados que otros. Por ello, cabe destacar en cuanto a la simulación de la temperatura del follaje, al mes de octubre, debido a que presenta una mejor correlación que los demás meses; lo que se puede apreciar con claridad en la Figura 4, donde se muestran las temperaturas simuladas y medidas para el mes de octubre versus el tiempo. La Figura 4 muestra solamente la primera semana de octubre, la cual posee el mejor RMSD, el cual corresponde a a 1.06°C. Es importante destacar que octubre representa un mes de estación media. Por otra parte, los resultados más lejanos a los reales para la temperatura del follaje se presentan en el mes de julio (Figura 5), donde se alcanza un RMSD de 5.25°C, lo que implica que los valores no son muy cercanos a los medidos.

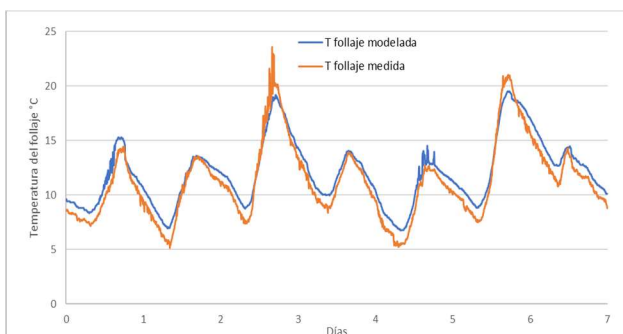


Figura 4. Resultados simulación temperatura del follaje entre el 1 y el 7 de octubre de 2017. Preparado por los autores, 2018.

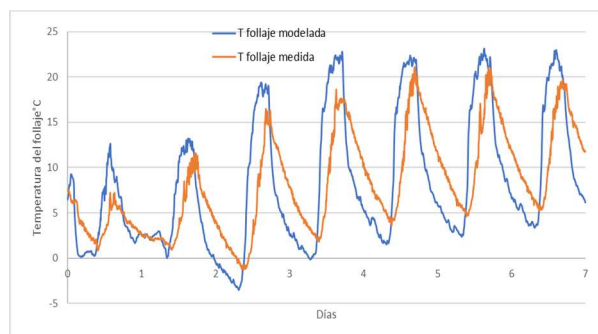


Figura 5. Resultados simulación temperatura del follaje entre el 15 y el 21 de julio de 2017. Preparado por los autores, 2018.

Validación experimental de la temperature del sustrato

Las Figuras 6 y 7 muestran una mejor correlación entre las temperaturas de sustrato simuladas en comparación con las mostradas para la temperatura del follaje (Figuras 4 y 5). Además, las temperaturas del sustrato no presentan muchas

variaciones entre lo medido y simulado de una temporada a otra (verano a invierno), como si ocurre en el caso del follaje. Una explicación posible es que las lluvias no afectan de sobremanera al sustrato, debido a que los mismos potes actúan como protectores frente al agua, por lo que el agua lluvia no logra llegar directamente hacia la tierra. Por otra parte, se aprecia una pequeña sobreestimación de los valores simulados respecto a lo medido para los meses de verano. Mientras que, para los resultados obtenidos en los meses de invierno (Figura 7), los valores tienden a ser subestimados, sobre todo en el mes de julio.

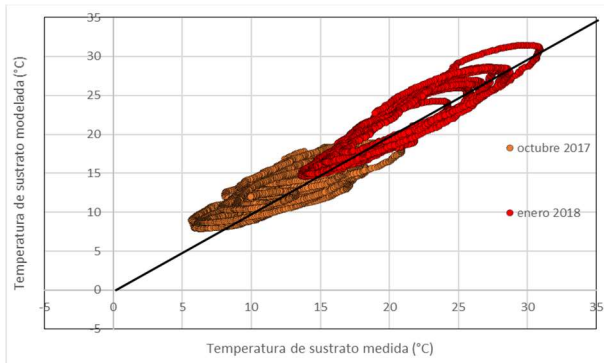


Figura 6. Correlación de resultados para temperatura del sustrato en meses cálidos. Preparado por los autores, 2018.

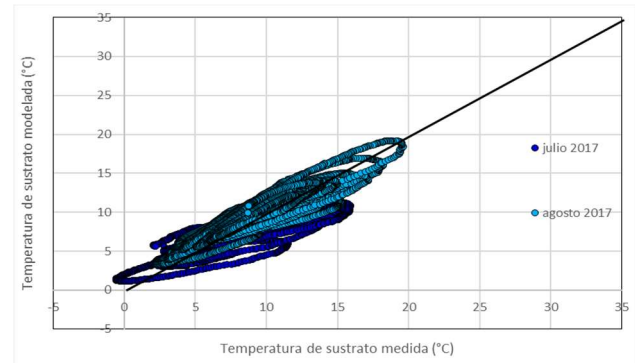


Figura 7. Correlación de resultados para temperatura del sustrato en meses fríos. Preparado por los autores, 2018.

Por otra parte, en cuanto a las simulaciones de la temperatura del sustrato versus tiempo, los mejores resultados se encuentran en el mes de enero de 2018, como se pueden apreciar en la Figura 8. El RMSD presentado para la semana del 10 al 16 de enero es 1,85°C, lo que viene dado principalmente por el pequeño desfase presentado entre los valores medidos y los modelados. Este desfase puede estar asociado nuevamente al contenido de humedad, el cual tiene influencia en la inercia, ya que de esta depende la capacidad calórica del sustrato y también la conductividad térmica. Por otro lado, en el mes de julio hay menos acuerdo entre las temperaturas del sustrato medidas y simuladas (Figura 9), los cuales muestran un RMSD de 2,5°C. En este caso, se presenta un pequeño desfase entre la temperatura modelada y medida, lo que genera que un incremento leve del RMSD.

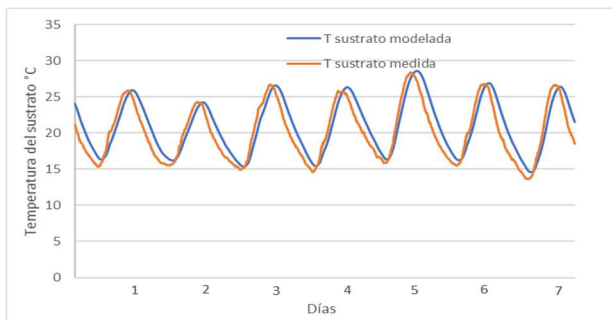


Figura 8. Resultados simulación temperatura del sustrato entre el 10 y el 16 de enero de 2018.

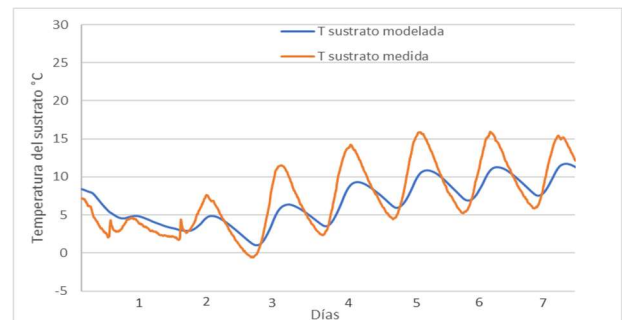


Figura 9. Resultados simulación temperatura del sustrato entre el 15 y el 21 de julio de 2017.

Discusión y Conclusiones

Al adaptar el modelo de techos a muros, se realizan simulaciones para variados meses, considerando los datos experimentales obtenidos de laboratorio. Con ello, se tiene que los meses con mejores resultados corresponden a los meses de verano para la temperatura del follaje, por lo que se concluye que tanto la lluvia como la radiación solar incidente en día nublados pueden tener ciertas implicancias en la simulación de estos valores. Por otra parte, los resultados obtenidos para la temperatura del sustrato no presentan grandes variaciones en su dispersión respecto de las temporadas de verano e invierno.

Los mejores resultados para la simulación de temperatura de follaje se presentan en octubre, el cual posee un RMSD de 1,06°C, mientras que, para la temperatura del sustrato se presentan en enero, con un RMSD de 1,85°C. Dichos resultados, presentan buenas aproximaciones de los valores simulados por el modelo respecto a los medidos en el LIVE. Por otra parte, los resultados de simulaciones más alejadas de los valores medidos se presentan ambos en el mes de julio, con valores de RMSD de 5,25°C para el follaje, mientras que para el caso del sustrato, se tiene un RMSD de 2,5°C.

Se espera corregir el desfase existente para las temperaturas del follaje en meses de invierno, de forma de ajustar el proceso de transpiración de las plantas y verificar su incidencia en las simulaciones.

Cabe destacar que el modelo de muros vegetales adaptado de techos presenta buenos resultados, especialmente para los meses de verano en cuanto a la temperatura del follaje y durante las temporadas cálidas y frías para la del sustrato. A partir de esto, se concluye que el modelo se comporta de manera correcta al predecir cercanamente la temperatura de mayor interés, la cual corresponde a la del sustrato.

Finalmente, se contribuye con la elaboración de un modelo de transporte de calor y masa para muros vegetales implementado en el software Matlab, capaz de predecir de buena manera la temperatura del sustrato, bajo condiciones climáticas semiáridas, la cual corresponderá a la condición de borde del modelo de simulación energética para evaluar el impacto de los muros vegetales en el desempeño energético de los edificios. De esta manera, el siguiente paso de investigación corresponde al acoplamiento del modelo desarrollado a la herramienta de simulación EnergyPlus, con objeto de poder realizar el estudio de su impacto en las cargas térmicas sensibles de este.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Cristian Godoy, técnico del laboratorio LIVE, que nos ayudó a realizar todas las mediciones necesarias para este estudio. Los autores agradecen el financiamiento de la Comisión Nacional de investigación Científica y Tecnológica de Chile mediante los proyectos FONDECYT 1150675 y 1181610, y el apoyo del proyecto CONICYT/FONDAP 15110020 CEDEUS.

Referencias

- Asociación Chilena de Eficiencia Energética (2016). *Elevado gasto energético en edificios por conceptos de climatización*. Disponible en: <https://www.acee.cl/elevado-gasto-energetico-en-edificios-por-concepto-de-climatizacion/>
- Chen, T., Armaly, B., & Ramachandran, N. (1986). Correlations for laminar mixed convection flows on vertical, inclined, and horizontal Hat plates. *Journal of Heat Transfer*, 108, 835-840.
- Churchill, S. W. (1977). A comprehensive correlating equation for lamina, assisting, force and free convection. *AIChE Journal*, 23(1), 10-16.
- He, Y., Yu, H., Ozaki, A., Dong, N., & Zheng, S. (2017). An investigation on the thermal and energy performance of living wall system in Shanghai area. *Energy and Buildings*, 140, 324-335. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.083>
- Malys, L., Musy, M., & Inard, C. (2014). A hydrothermal model to assess the impact of green walls on urban microclimate and building energy consumption. *Building and Environment*, 73, 187-197. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.12.012>
- Pinto, C. (2017). Coupling EnergyPlus and two improved and validated heat and mass transfer vegetated roof models in matlab for retail building energy simulations in semiarid climates. Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.
- Scarpa, M., Mazzali, U., & Peron, F. (2014). Modeling the energy performance of living walls: Validation against field measurements in temperate climate. *Energy and Buildings*, 79, 155-163. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.04.014>
- Tabares-velasco, P. C., Zhao, M., Peterson, N., Srebric, J., & Berghage, R. (2012). Validation of predictive heat and mass transfer green roof model with extensive green roof field data. *Ecological Engineering*, 47, 165-173. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.06.012>