

Comportamiento térmico de una doble fachada verde en otoño. Resultados preliminares.

Thermal behaviour of a double green façade in autumn. Preliminary results.

Flores Larsen, Silvana

Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO), Universidad Nacional de Salta – CONICET

Avenida Bolivia 5150, (4400) Salta, Argentina

Email: seflores@unsa.edu.ar

Filippín, Celina

CONICET, CC302, Santa Rosa, 6300 La Pampa, Argentina

Email: cfilippin@cpenet.com.ar

Marek, León

Dirección: Emilio Mitre 660, Santa Rosa, 6300 La Pampa, Argentina

Email: arqlmarek@gmail.com

Hongn, Marcos

Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO), Universidad Nacional de Salta – CONICET

Avenida Bolivia 5150, (4400) Salta, Argentina

Email: marcoshongn@gmail.com

Código del manuscrito: 10_003

Fecha de aceptación: 04/10/2019

Resumen

El presente trabajo describe los primeros resultados del estudio del comportamiento térmico de una enredadera en una doble fachada verde. Se realizaron mediciones experimentales en el interior del follaje y simulaciones computacionales de la temperatura de hoja, el balance energético y las propiedades ópticas de interés en la transferencia de calor. La doble fachada estudiada está vegetada con una enredadera *Ipomoea cairica* “Campanilla rosa”, cubriendo una superficie de 5 m de largo, 2.20 m de alto y separada una distancia de 0.50 m de la pared. Está orientada hacia el Norte y está ubicada en la planta alta de una vivienda particular de la ciudad de Santa Rosa, La Pampa. Se monitoreó cada 15 minutos la temperatura y humedad relativa del aire en tres posiciones a lo largo de la fachada verde: al inicio, al centro y al final de la misma, y las condiciones meteorológicas exteriores. Para el análisis se seleccionaron un día soleado y un día nublado. La simulación computacional se realizó mediante un nuevo módulo de SIMEDIF, para dobles fachadas verdes. Se obtuvo la temperatura de hoja, la energía absorbida y transformada en calor latente, y las propiedades ópticas de la planta.

Palabras claves: Doble fachada verde, Enredaderas, Enverdecimiento urbano

Abstract

The present work describes the first results of the study of the thermal behavior of a climbing plant in a double green façade. Experimental measurements were made inside the foliage together with computational simulations of leaf temperature, energy balance and optical properties of interest in heat transfer. The double facade studied is vegetated with an *Ipomoea cairica* “morning glory”, covering a surface of 5 m long, 2.20 m high and separated by a distance of 0.50 m from the wall. It faces north and is located on the first floor of a private home in the city of Santa Rosa, La Pampa. The temperature and relative humidity of the air were monitored every 15 minutes in three positions along the green façade: at the beginning, at the center, and at the end. Exterior weather conditions were also registered. For the analysis, a sunny day and a cloudy day were selected. The computational simulation was carried out through a new module of SIMEDIF, for double green facades. The leaf temperature the energy absorbed and transformed into latent heat, and the optical properties of the plant, were successfully obtained.

Keywords: Double green wall, Climbing plants, Urban greening

Introducción

Uno de los caminos efectivos para reducir el consumo energético de verano en las construcciones es la aplicación de estrategias bioclimáticas de diseño (orientación del edificio, aislación térmica, materiales utilizados, ganancia directa, etc.) y, en particular, la utilización de fachadas protegidas por material vegetal, más conocidas como “living wall”, “jardines verticales” o “dobles fachadas verdes” de acuerdo al tipo de sistema utilizado.

Esta estrategia tiene la ventaja de poder ser incluida no sólo durante la etapa de diseño del edificio, sino como mejora de un edificio preexistente (rehabilitación). En verano, las plantas presentan mayor eficiencia térmica que los elementos de sombreado tradicionales debido a que la temperatura superficial de las hojas es menor que la de un dispositivo de sombreado convencional, como cortinas de enrollar, aleros, dispositivos de sombreado metálicos o de mampostería (Ip *et al.*, 2010). Esto se debe a que un porcentaje mayoritario de la radiación solar absorbida por la planta (alrededor de un 60%, dependiendo del tipo de planta, nivel de humedad, época del año, etc.) es transformado en calor latente debido al proceso fisiológico de evapotranspiración, lo que ocasiona que la temperatura de las hojas no se eleve en la misma magnitud que los materiales convencionales de los dispositivos de sombreado, en los que toda la energía absorbida se transforma en calor sensible. Además, las plantas presentan otros efectos interesantes cuando se utilizan en edificios, que van desde lo ambiental (absorción de CO₂, influencia en el microclima a través de la mitigación de la isla de calor urbana (Afshari, 2017) o el confort a nivel pedestre (Morakinyo *et al.*, 2018), etc.) hasta lo estético y psicológico (disminución del estrés, atenuación del nivel sonoro exterior, acercamiento visual a elementos naturales (Riley, 2017; Yang *et al.*, 2018).

A nivel edilicio, las plantas ayudan a disminuir el consumo energético destinado a refrigeración en los periodos calurosos, debido a su capacidad de sombreado y a la evapotranspiración. Por ejemplo, se encontraron reducciones de alrededor del 12-32% en las cargas de enfriamiento para un edificio en Singapur con 50% y 100% de cobertura de acristalamiento, respectivamente (Wong *et al.*, 2009). Por su parte, Di y Wang (1999) reportaron reducciones del 28% en una pared Oeste cubierta de vegetación en verano. Wong *et al.* (2010) encontraron disminuciones de temperatura de la superficie externa de muros entre 1.1°C y 11.6°C, dependiendo del tipo de vegetación. Otros estudios informaron reducciones de 5.5 °C (Pérez *et al.*, 2011) y entre 1.9–8.3°C (Eumorfopoulou y Kontoleon, 2009).

El presente trabajo describe los primeros resultados del estudio del comportamiento térmico de una enredadera en una doble fachada verde. Se realizaron mediciones experimentales en el interior del follaje y simulaciones computacionales de la temperatura de hoja, el balance energético y las propiedades ópticas de interés en la transferencia de calor.

Metodología

Descripción de la doble fachada verde y monitoreo experimental

La doble fachada estudiada está ubicada en la planta alta de una vivienda particular de la ciudad de Santa Rosa, La Pampa, en una zona urbana de baja densidad constructiva. Está orientada hacia el Norte, cubriendo la fachada de un ambiente (Estudio) en planta alta, que cuenta con aventanamientos hacia esa orientación (ver Figura 1). Sus dimensiones son 5 m de largo y 2.20 m de alto, separada una distancia de 0.50 m de la pared mediante una pasarela que permite el mantenimiento y la poda de las enredaderas. El tipo de planta es una enredadera *Ipomoea cairica* “campanilla rosa” adulta.

Se instalaron adquirentes de datos de la marca HOBO (protegidos de la radiación solar directa), a una altura de 4.80 m desde el nivel de piso de la vivienda (+0.90m), con los que se midió la temperatura y humedad relativa del aire en tres posiciones en un mismo plano en el interior del follaje de la fachada verde: al inicio (hacia el Este), al centro y al final (hacia el Oeste) de la misma, a 0.1 m, 2.5 m y 4.9 m medidos desde el Este (ver Figura 1b). También se midió la temperatura y humedad relativa del aire en la zona de circulación de la pasarela ubicada entre el muro y la fachada

verde (Fig. 1c), ubicando un sensor en el centro geométrico de la pasarela (4.80 m de altura y 2.5m en el sentido del eje mayor de la pasarela). Los datos se registraron cada 15 minutos, en el periodo comprendido entre el 11 de marzo y el 31 de marzo de 2019. Se monitorearon las condiciones meteorológicas exteriores mediante sensores de similares características a los instalados en la fachada. Se midió temperatura y humedad del aire (en el lugar de la vivienda) y

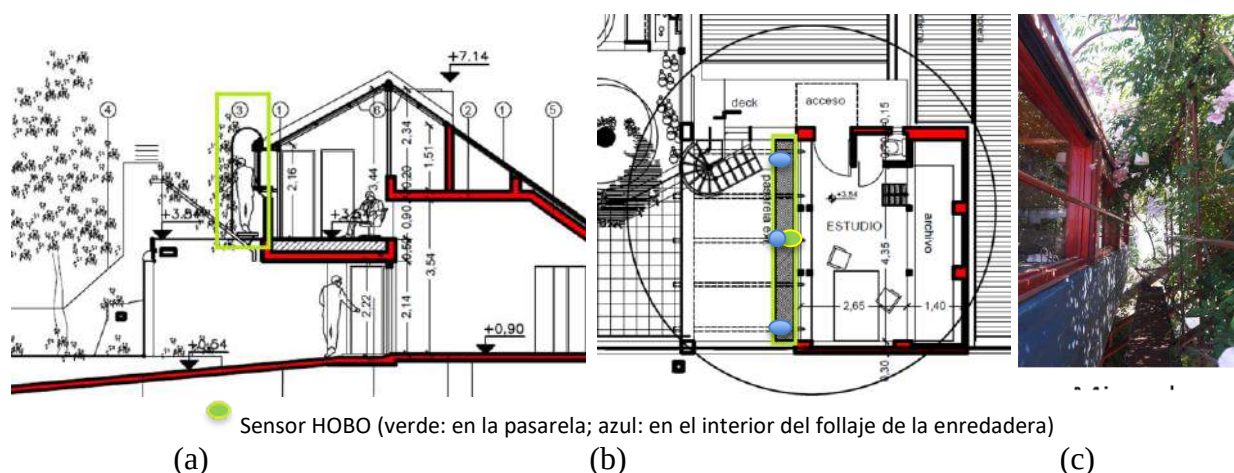


Figura 1: doble fachada monitoreada, en donde se observa la planta y corte de la ubicación de la doble fachada en la planta alta de la vivienda (a y b) y la ubicación del sensor de medida en la pasarela (c).

radiación solar sobre superficie horizontal (dato obtenido de la estación más cercana, Estación Experimental INTA Anguil, La Pampa, a 30 km de la ciudad de Santa Rosa). En este trabajo, se muestran los resultados para dos días extremos (uno nublado y uno soleado), con el objeto de analizar el comportamiento térmico de las hojas de la enredadera bajo estas dos condiciones meteorológicas.

Simulación computacional

La simulación del comportamiento de la planta se llevó a cabo mediante el software SIMEDIF V2.0 (SIMEDIF, 2019), que en su nueva versión cuenta con un módulo para simular fachadas verdes utilizando la metodología descrita en Flores Larsen et al. (2015). El programa SIMEDIF es una herramienta de diseño desarrollada en el INENCO (UNSa-CONICET) para calcular la temperatura horaria en los ambientes interiores de un edificio, la temperatura de las superficies de las paredes y la energía auxiliar de calefacción/refrigeración que se necesita para mantener los espacios a una dada temperatura y el nivel de confort térmico según ASHRAE55. Permite analizar su comportamiento frente a diferentes condiciones climáticas, detectar problemas de falta de confort (sobrecalentamiento o bajas temperaturas), evaluar las distintas alternativas constructivas durante la etapa de diseño, como por ejemplo variaciones en la geometría del mismo, orientación, ubicación y tamaño de áreas vidriadas, estructura y conformación de la envolvente, materiales y sistemas de acondicionamiento pasivos e híbridos a utilizar, etc. El modelo de fachada verde recientemente incluido en el software permite, a través de un balance energético, estimar la energía absorbida por las hojas, la fracción que es transformada en calor latente y la temperatura de las hojas. Los procesos de transferencia de calor involucrados en el balance de energía de una hoja son: absorción de radiación solar, intercambio de calor sensible por convección entre la hoja y el aire circundante, intercambio de energía infrarroja entre la hoja y el entorno, calor latente expulsado por la planta por transpiración, almacenamiento de energía en los tejidos, conducción a través de la hoja (generalmente despreciable) y energía para los procesos metabólicos necesarios para la fotosíntesis o catabolismos (despreciables).

Las propiedades espectrales de las hojas hacen que el follaje sea altamente absorbente en el rango de longitud de onda visible (radiación fotosintéticamente activa, PAR), de 400 nm a 720 nm, y moderadamente reflectante en la región del infrarrojo cercano de 720 nm a 4000 nm (Sellers et al., 1997). Para calcular estas propiedades ópticas,

SIMEDIF incluye el modelo PROSPECT-D (Féret et al., 2017), ampliamente validado con datos experimentales en el ámbito de la biología. Este modelo permite calcular la reflectancia y transmitancia espectral de una hoja, en base al contenido de agua, de pigmentos (clorofilas a y b, carotenoides), de la materia seca presente en la misma y del índice de refracción de la hoja. Existe una aplicación web (<http://opticleaf.ipgp.fr>), pero en el caso de SIMEDIF se optó por utilizar el código en Python disponible, adaptándolo a las necesidades del software. Esto permitió incluir además las bases de datos LOPEX'93 (Leaf Optical Properties Experiment Database) y Angers, ambas disponibles en EcoSIS Spectral Library (www.ecosys.org), que disponen de los contenidos de pigmento y agua de una gran variedad de plantas. Ambas bases de datos se incorporaron a SIMEDIF. Estos valores espectrales son luego multiplicados por el espectro solar standard (AM=1.5) para obtener la radiación solar efectivamente transmitida por una hoja, y luego se utiliza el LAI (Índice de Área Foliar) para estimar la transmitancia de la planta completa. Más detalles de los modelos utilizados para calcular las propiedades ópticas de la planta se encuentran en Flores Larsen et al. (2018).

Resultados

Resultados experimentales

La Figura 2 muestra la irradiación solar sobre superficie horizontal y la temperatura y humedad relativa del aire exterior durante el periodo estudiado. Los días fueron mayormente despejados (radiación máxima al mediodía solar del orden de 850 W/m^2), con un día de precipitación leve (15 de marzo) y un día de cielo nublado sin precipitación (28 de marzo). La temperatura ambiente osciló entre 6.6°C y 37.1°C . Se seleccionaron dos días para un análisis detallado del comportamiento térmico de la hoja: un día nublado (28 de marzo) y un día despejado (30 de marzo, el día más caluroso del periodo monitoreado), que se muestran en las zonas anaranjadas de la Figura 2.

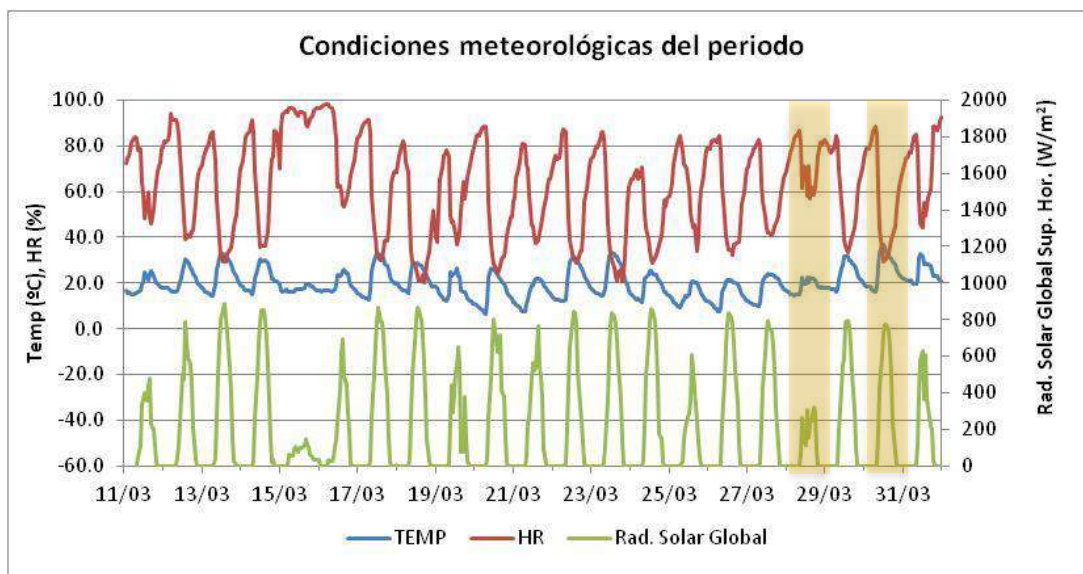


Fig. 2. Condiciones meteorológicas del periodo de medida en el entorno de la fachada verde: temperatura del aire ($^\circ\text{C}$), humedad relativa (%) y radiación solar global sobre superficie horizontal (W/m^2).

La Figura 3 muestra el comportamiento térmico para ambos días. Los datos medidos indican que, durante las últimas horas nocturnas (4-6AM), el aire en el interior del follaje está entre 0.8°C y 1.2°C más cálido que el aire exterior. Esto puede deberse a que el aire exterior sufre los efectos del enfriamiento radiante nocturno de las superficies circundantes, mientras que en el interior del follaje este efecto está notoriamente atenuado. Durante el día, la temperatura del aire en el interior del follaje es muy similar a la exterior. Por otra parte, si se comparan las medidas de los tres sensores ubicados dentro del follaje, se encuentra que el sensor ubicado en el extremo Oeste (ver Fig. 1b)

registra mayores temperaturas que los otros dos (lo cual podría deberse a que este sensor pudiera estar sobrecalentándose a partir del mediodía por la incidencia de radiación directa en alguna parte de la cobertura protectora). Finalmente, la temperatura en la pasarela no registra diferencias con la temperatura exterior medida.

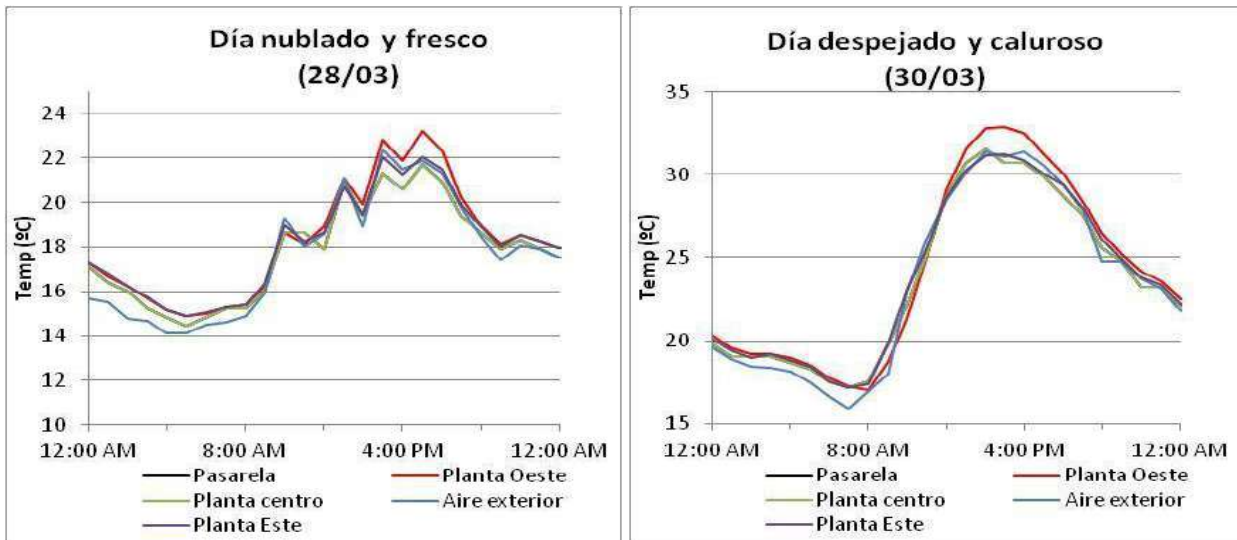


Fig. 3. Mediciones de la temperatura del aire dentro del follaje de la planta en tres zonas de follaje a lo largo del eje principal de la fachada (Este, centro y Oeste), temperatura en la pasarela y temperatura medida en el entorno exterior de la fachada.

Resultados de la simulación con SIMEDIF

Las Figuras 4 y 5 muestran las simulaciones con SIMEDIF de la temperatura alcanzada por una hoja expuesta a la radiación solar, durante las horas de sol, y del balance energético en la planta, para un día soleado (30 de marzo) y para un día nublado (28 de marzo). En el día soleado (Figura 4), se observa que la temperatura de la hoja es siempre mayor que la temperatura ambiente, siendo esta diferencia más pronunciada en horas del mediodía solar. En este periodo del día, la temperatura de hoja es aproximadamente 4.8°C más alta que el ambiente exterior. Por el contrario, a las primeras horas de la mañana y últimas de la tarde, ambas temperaturas tienden a alcanzar valores semejantes, como es de esperar dado que la energía solar absorbida es mucho más baja. Por otra parte, se observa que, de la radiación absorbida por la hoja, en promedio, un 46% de la energía se transforma en calor latente (es decir, es utilizada por la planta para evaporación). En este caso, el calor latente oscila entre 120 y 160 W/m². Este promedio se mantiene aproximadamente constante durante todas las horas de sol.

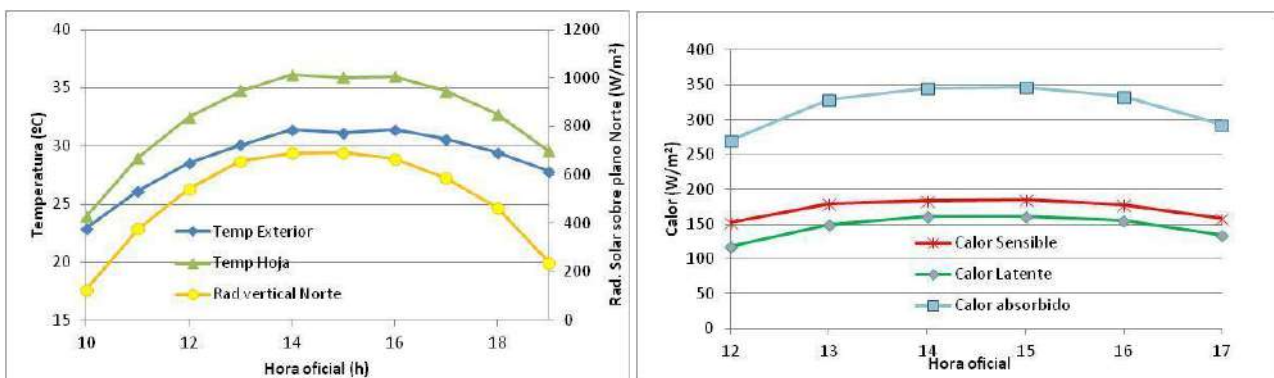


Fig. 4. Simulaciones con SIMEDIF de la temperatura de hoja y del calor absorbido, sensible y latente de la planta, para el día soleado (30 de marzo).

La Figura 5 muestra, durante las horas de sol en un día nublado, las simulaciones de la temperatura de una hoja y del balance energético en la planta. Nuevamente, la temperatura de la hoja es mayor que la temperatura ambiente, con una respuesta a la incidencia de la radiación solar. La temperatura de la hoja no supera los 23.1°C en todo el día. Desde el mediodía solar (después de las 13:00, hora oficial), el calor latente se mantiene aproximadamente constante en todas las horas de sol, con un valor de alrededor de 40 W/m². En promedio, el 20% de la energía absorbida por la hoja se transforma en calor latente.

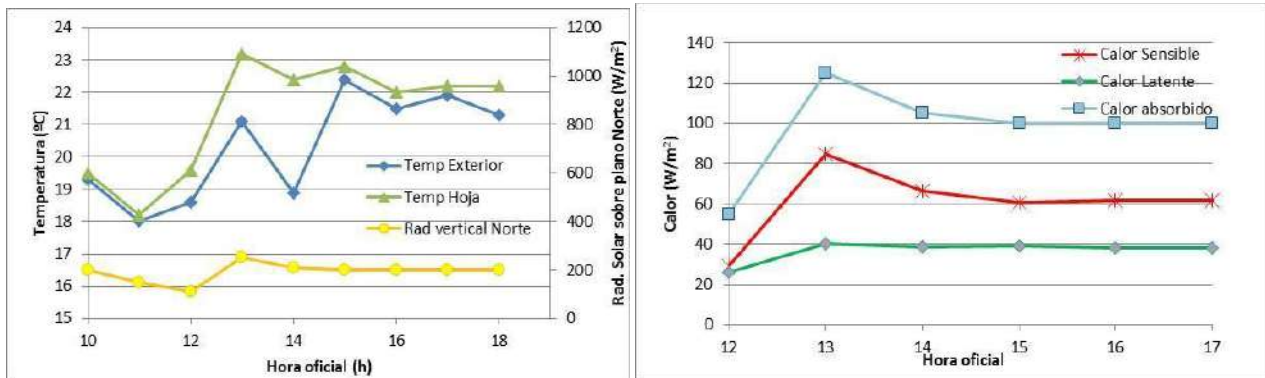


Fig. 5. Simulaciones con SIMEDIF de la temperatura de hoja y del calor absorbido, sensible y latente de la planta, para el día nublado (28 de marzo).

Transmitancia espectral en el rango solar

SIMEDIF entrega como archivo de salida la transmitancia y reflectancia espectral de la hoja seleccionada, en un intervalo de longitudes de onda entre 400 y 2500 nm. La Fig. 6 muestra los resultados de la transmitancia para la hoja estudiada. En esta figura, es interesante observar el efecto de la clorofila (que absorbe la radiación solar en dos rangos específicos del espectro visible, de acuerdo a si es clorofila a o clorofila b) y del contenido de agua de la hoja (que absorbe la radiación solar en dos rangos del infrarrojo cercano). El valor de transmitancia en todo el espectro solar, ponderado para un espectro solar standard (Masa de aire=1.5), es de 0.34, mientras que la reflectancia solar y la absorptancia se estimaron en 0.27 y 0.39, respectivamente.

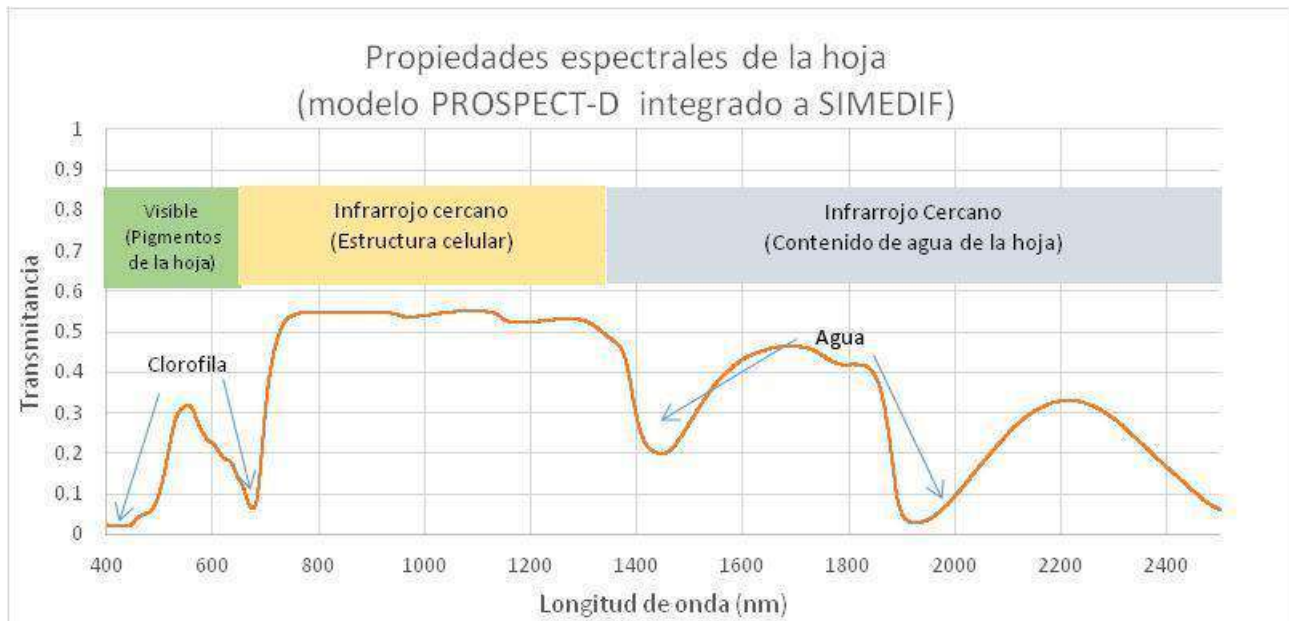


Fig. 6. Cálculo de la transmitancia de una hoja de enredadera similar a la de la fachada verde (*Parthenocissus Tricuspidata*) con el modelo PROSPECT-D incluido en SIMEDIF.

Conclusiones

Los resultados de las mediciones y simulaciones realizadas sobre la doble fachada verde, analizando un día soleado y un día nublado, permiten realizar una primera aproximación al comportamiento térmico de una planta. Los resultados más relevantes son los siguientes:

- La temperatura de la hoja, durante las horas de sol, tiende a tomar valores mayores a la temperatura ambiente, debido a la absorción de la radiación solar. Este efecto es más marcado cuanto mayor es la radiación solar.
- La temperatura de la hoja es importante para el cálculo de la transferencia radiativa entre el muro y el entorno.
- El calor latente evaporado por la planta oscila entre 20% (para días nublados) y 46% (para días despejados), como resultado del proceso de adaptación de la planta a condiciones ambientales variables. A mayor radiación solar incidente, mayor el porcentaje de la radiación absorbida que es destinada a la evapotranspiración.
- Se estimó que el calor latente evaporado alrededor del mediodía solar es de alrededor de 40 W/m^2 (para días nublados) y 160 W/m^2 (para días despejados).
- El modelo PROSPECT-D permite calcular las propiedades ópticas espectrales de distintos tipos de plantas y bajo diferentes condiciones de contenidos de pigmentos y de contenido de agua. En el caso estudiado, la absorptancia solar de la hoja resultó en aproximadamente 0.39.

En el futuro, se prevé validar el modelo completo, es decir, considerando el aporte de la planta en la disminución de la radiación solar incidente sobre el muro protegido por el material vegetal.

Agradecimientos

Este trabajo fue parcialmente financiado por ANPCYT (PICT ANPCYT 2014-2605) y Universidad Nacional de Salta (CIUNSa 2489).

Referencias

- Afshari A., 2017. A new model of urban cooling demand and heat island—Application to vertical greenery systems (VGS). *Energy and Buildings*, 157, pp. 204-217
- Di, H.F., Wang, D.N., 1999. Cooling effect of ivy on a wall. *Exp. Heat Transf.*, 235–245.
- Eumorfopoulou, E.A., Kontoleon, K.J., 2009. Experimental approach to the contribution of plant covered walls to the thermal behaviour of building envelopes. *Build. Environ.* 44, 1024–1038.
- Féret J.B., A.A. Gitelson, S.D. Noble, S. Jacquemoud, PROSPECT-D: Towards modeling leaf optical properties through a complete lifecycle, *Remote Sensing of Environment*, Volume 193, 2017, Pages 204-215.
- Fjeld, T., Veiersted, B., Sandvik, L., Riise, G., Levy, F., 1998. The effect of indoor foliage plants on health and discomfort symptoms among office workers. *Indoor Built Environ.* 7 (4), 204–209.
- Flores Larsen S., Filippín C., Lesino G., Modeling double skin green façades with traditional thermal simulation software, *Solar Energy*, Volume 121, 2015, Pages 56-67.
- Flores Larsen S., Castro N., Filippín C., López C. Modeling the spectral solar transmittance of double green facades for energy simulation. *ESG 2018, International Conference on Energy Engineering and Smart Grids*, Cambridge, UK, 2018.
- Ip K., Lam M., Miller A., 2010. Shading performance of a vertical deciduous climbing plant canopy. *Building and Environment*, 45 (2010), pp. 81-88.
- Pérez, G., Rinco'n, L., Vila, A., González, J., Cabeza, L., 2011. Green vertical systems for buildings as passive systems for energy savings. *Appl. Energy* 88, 4854–4859.
- Riley B., 2017. The state of the art of living walls: Lessons learned. *Building and Environment*, 114 (2017), pp. 219-232
- Sellers, P.J., Dickinson, R.E., Randall, D.A., Betts, A.K., Hall, F.G., Berry, J.A., Collatz, G.J., Denning, A.S., Mooney, H.A., Nobre, C.A., Sato, N., Field, C.B., Henderson-Sellers, A., 1997. Modeling the exchanges of energy, water, and carbon between continents and the atmosphere. *Science*, 275, Disponible en:
http://biocycle.atmos.colostate.edu/Documents/SiB/Sellers_1997_Science.pdf.
- SIMEDIF, 2019. Software para el cálculo del comportamiento de edificios. Disponible en:
<http://170.210.201.130/index.php/es/software/simedif-2-0-calculo-termico-de-edificios/>
- Wong, N.H., Tan, A.Y.K., Tan, P.Y., Wong, N.C., 2009. Energy simulation of vertical greenery systems. *Energy Build.* 41, 1401–1408.
- Wong, N.H., Kwang Tan, A.Y., Chen, Y., Sekar, K., Tan, P.Y., Chan, D., et al., 2010. Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls. *Build. Environ.* 45, 663–672.
- Feng Yang, Feng Yuan, Feng Qian, Zhi Zhuang, Jiawei Yao, 2018. Summertime thermal and energy performance of a double-skin green facade: A case study in Shanghai, *Sustainable Cities and Society*, Volume 39, 2018, Pages 43-51,