



Estudio de propiedades térmicas de sustratos utilizados en cubiertas vegetales

Macarena Mazzachiodi¹, alumna de quinto año

Victoria Sandoval^{1,2}, alumna de magister de primer año

Francisco Suárez¹, profesor asistente

Felipe Victorero³, arquitecto

Carlos Bonilla^{1,2}, profesor asociado

Jorge Gironás^{1,2,4}, profesor asociado

Sergio Vera^{2,3}, profesor asistente

Waldo Bustamante^{2,5}, profesor titular

Victoria Rojas⁶, arquitecto

Pablo Pastén^{1,2}, profesor asociado

¹DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL, ESCUELA DE INGENIERÍA, PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE

²CENTRO DE DESARROLLO URBANO SUSTENTABLE (CEDEUS), FONDAP-CONICYT, CHILE

³DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA Y GESTIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN, ESCUELA DE INGENIERÍA, PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE

⁴CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CAMBIO GLOBAL, PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE

⁵ESCUELA DE ARQUITECTURA, PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE

⁶VR+ARQ, CHILE

INTRODUCCIÓN

El desarrollo urbano sustentable ha promovido diversas soluciones tecnológicas que minimizan los impactos adversos de una ciudad. Las **cubiertas vegetales** son estructuras con múltiples capas constructivas que permiten incorporar vegetación a las construcciones (Figura 1), y que han captado la atención de nuestra sociedad debido a que entregan grandes y variados beneficios de manera simultánea. Por ejemplo, permiten remover contaminantes, atenuar ruidos, incrementar la biodiversidad, reducir la escorrentía y mejorar el aislamiento térmico de estructuras, además de proporcionar ambientes más placenteros en el contexto urbano [1].

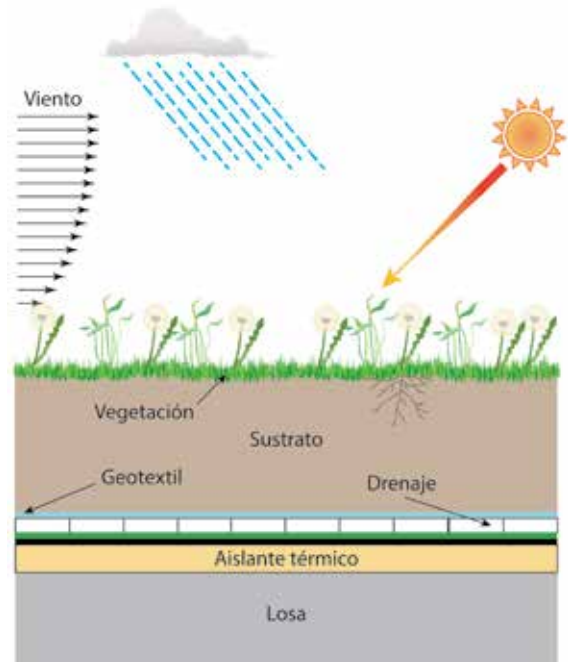


Figura 1. Esquema de las capas constructivas de una cubierta vegetal y de los flujos de agua y de calor que ocurren en ella.

Para que una cubierta vegetal entregue los beneficios anteriormente señalados se debe diseñar correctamente cada una de sus capas constructivas. El **sustrato** es una de las capas de mayor interés porque entrega a la vegetación los recursos necesarios para su sobrevivencia: nutrientes, agua y un medio en el cual crecer [2]. La resistencia térmica del sustrato controla las temperaturas a las cuales están sometidas las raíces de las plantas, un factor vital para la subsistencia de la vegetación [2]. Por otro lado, los sustratos también tienen un rol importante en los flujos de agua y calor en la cubierta, influyendo en su eficiencia térmica y generalmente reduciendo los costos de climatización [3-5].

A pesar de su relevancia, los sustratos comúnmente disponibles en el mercado no cuentan con una caracterización que permita comprender los principales procesos físicos que ocurren en ellos. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es determinar las propiedades térmicas de distintos sustratos comúnmente utilizados en cubiertas vegetales chilenas. Esta caracterización es el primer paso para generar herramientas de modelación que permitan predecir el comportamiento de las cubiertas vegetales y apoyen el diseño de estas soluciones tecnológicas.

METODOLOGÍA

Se seleccionaron sustratos comúnmente empleados en cubiertas vegetales y luego se procedió a medir sus propiedades con sensores especializados. Los sustratos elegidos son los siguientes (Figura 2):

- **LIVE:** sustrato similar a un suelo franco arenoso [6] y usado en el proyecto Laboratorio de Infraestructura Vegetal de Edificios (LIVE UC).
- **Perlita:** sustrato que contiene tierra de hojas y perlita, un mineral volcánico.
- **Tierra de hoja:** sustrato formado a partir de residuos vegetales.
- **Ladrillo:** sustrato que contiene ladrillo molido, compuesto principalmente por arcilla [7].



Figura 2. Sustratos analizados. De izquierda a derecha: LIVE, perlita, tierra de hoja y ladrillo.

Las propiedades térmicas de un sustrato permiten predecir la propagación de los flujos de calor que ocurren en la superficie de las cubiertas vegetales (**radiación, calor sensible y calor latente**). Este flujo de calor viaja a través del sustrato principalmente por **conducción de calor** y depende del **contenido de humedad** (θ) del medio [8]. La **conductividad térmica** $\lambda(\theta)$, la **capacidad calorífica volumétrica** $C(\theta)$ y la **difusividad térmica** $D(\theta)$ (la razón entre $\lambda(\theta)$ y $C(\theta)$), son las propiedades que se necesitan para resolver la **conservación del flujo de calor** [7]:

$$(1) \quad C(\theta) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(\theta) \frac{\partial T}{\partial z} \right]$$

donde se asume flujo en la dirección vertical (z) y T es temperatura. En la Ecuación 1 se ha despreciado el efecto de la **advección** dentro del sustrato.

Se desarrolló un protocolo experimental que permitió determinar las propiedades térmicas en función de la humedad de los distintos sustratos. Se incrementó el θ de las muestras agregando una cantidad conocida de agua y se esperó hasta que el agua estuviese distribuida de manera uniforme en el recipiente. Una vez alcanzado este estado de equilibrio, se volvieron a medir las propiedades térmicas y el nuevo θ . Este procedimiento se repitió hasta alcanzar la **humedad de saturación** (θ_{sat}).

La humedad se midió con un sensor **TDR** [10], mientras que las propiedades de los sustratos, con una sonda de doble aguja. Esta última se conectó a un analizador de propiedades térmicas [9], el cual mide $C(\theta)$ y $D(\theta)$ y, en base a estas, se obtuvo $\lambda(\theta)$ (ver principio científico). Los puntos experimentales de $\lambda(\theta)$ fueron utilizados para encontrar una curva de conductividad térmica, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$(2) \quad \lambda(\theta) = b_1 + b_2\theta + b_3\theta^{0,5}$$

donde b_1 , b_2 y b_3 son parámetros que se obtienen mediante la técnica de los **mínimos cuadrados** [11].

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 3 muestra la conductividad térmica normalizada, $\lambda_N = \lambda(\theta)/\lambda_{dry}$, en función del nivel de saturación, $S_r = \theta / \theta_{sat}$, para el sustrato LIVE y para un suelo orgánico. En este caso λ_{dry} es la **conductividad térmica del sustrato seco**. La curva del sustrato LIVE se asemeja a una curva de suelo natural. Al aumentar la humedad del sustrato LIVE, la conductividad aumenta de cinco a seis veces su valor inicial, en cambio, para un suelo orgánico, esta aumenta siete veces. Este comportamiento es consistente con lo reportado en la literatura [2], donde la conductividad varía de manera importante debido a cambios en la humedad del medio [7]. Por otro lado, los valores máximos de conductividad siguen el siguiente orden [2]: arena (2,07 W/m-°C) > limo (1,22 W/m-°C) > arcilla (1,09 W/m-°C) > sustrato orgánico (0,49 W/m-°C). Respecto del sustrato LIVE, el valor obtenido es de 0,79 W/m-°C, que es un valor intermedio entre limos y suelos orgánicos. Esto es esperable debido a que el sustrato LIVE contiene grandes cantidades de limo y de materia orgánica. Por ende se puede deducir que el desempeño térmico y constructivo del sustrato LIVE es mejor que el de un suelo natural: al tener una conductividad térmica baja, el flujo de calor es menor, logrando un mejor aislamiento térmico. Por otro lado, la **densidad aparente** del sustrato LIVE es menor que la de suelos naturales [12]. Esto le da una ventaja constructiva a este último debido a que, al ser más liviano, las estructuras que soportan a una cubierta vegetal estarán sometidas a sollicitaciones menores.

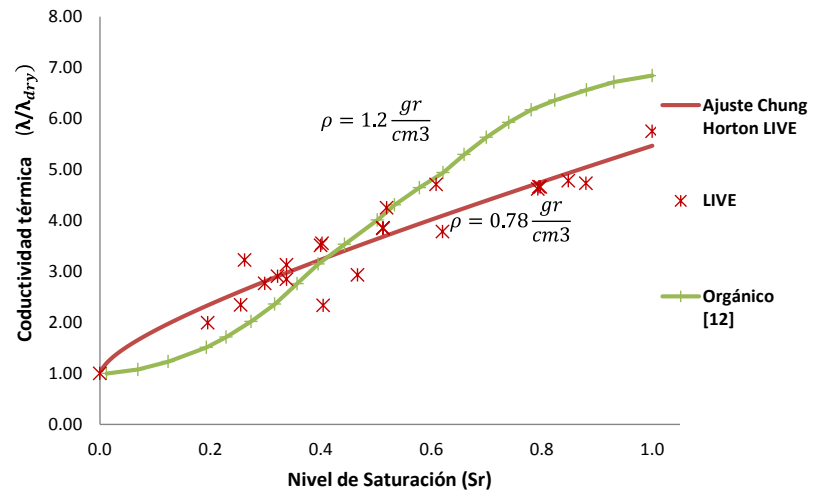


Figura 3. Comparación del sustrato LIVE con un sustrato abundante en materia orgánica y de mayor densidad aparente [12].

Las curvas de conductividad térmica para las distintas muestras ensayadas se presentan en la Figura 4. El sustrato LIVE es el que posee los mayores valores de conductividad térmica, y su ajuste con el modelo de Chung y Horton [11] tiene un coeficiente de determinación (r^2) de 88,9%. El ajuste de este modelo a los otros sustratos tiene siempre un r^2 mayor que un 94,3%. Además, los valores de conductividad están en el mismo orden de magnitud que otros sustratos utilizados en cubiertas vegetales [5]. Dado que los sustratos tierra de hoja y ladrillo tienen las menores conductividades, son los mejores sustratos para aislar térmicamente una cubierta vegetal.

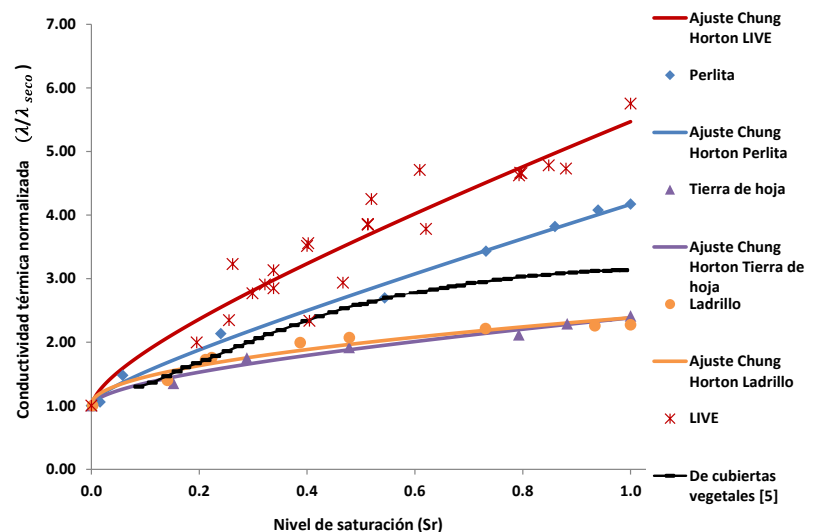


Figura 4. Ajuste del modelo de Chung y Horton [11] a los sustratos analizados y comparación con sustratos típicos de cubiertas vegetales [5].

La capacidad calórica medida experimentalmente concuerda con valores de referencia obtenidos en otros estudios [2]. La Figura 5 muestra que los sustratos LIVE y ladrillo son los que poseen valores más altos de capacidad calórica, asemejándose al comportamiento de un suelo arenoso. A mayor capacidad calórica, más cantidad de calor se necesita para aumentar la temperatura de la cubierta; por lo tanto, se aísla mejor el sistema. Por otro lado, la tierra de hoja tiene un comportamiento distinto: para humedades bajo $0,4 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ se comporta como un sustrato arenoso, pero para valores superiores a $0,4 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, su comportamiento se asemeja a uno orgánico.

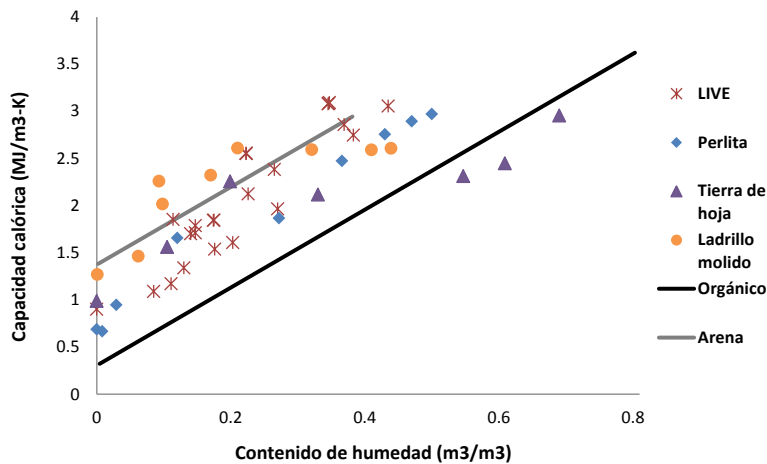


Figura 5. Curvas de capacidad calórica. Puntos: datos experimentales (LIVE, perlita, tierra de hoja y ladrillo). Líneas continuas: valores de referencia para suelos orgánicos y arenas [2].

Las curvas de difusividad térmica obtenidas experimentalmente se presentan en la Figura 6. La difusividad de los sustratos está en el mismo orden de magnitud que la de otros suelos [2], teniendo un valor menor que la de suelos arenosos o limosos, y levemente mayor que la de suelos orgánicos. Además, los sustratos ensayados muestran un valor relativamente constante para distintos niveles de humedad. El sustrato LIVE presenta una difusividad media de $2,5 \text{ mm}^2/\text{s}$ y una variabilidad mayor que la de los otros sustratos. El comportamiento de la perlita se asemeja bastante al de un suelo orgánico, al igual que la tierra de hoja. El ladrillo, en tanto, tiene una difusividad levemente mayor a bajas humedades, al igual que lo que ocurre en suelos arenosos o limosos [3]. En general, se puede concluir que los sustratos presentan una difusividad térmica menor que la de suelos típicos. Esto significa que se demorarán más tiempo que los suelos naturales en alcanzar equilibrio térmico, sugiriendo que los flujos de calor en los sustratos viajarán más lentamente que en suelos. Estos resultados demuestran que en cubiertas vegetales es más beneficioso utilizar sustratos en vez de suelos naturales.

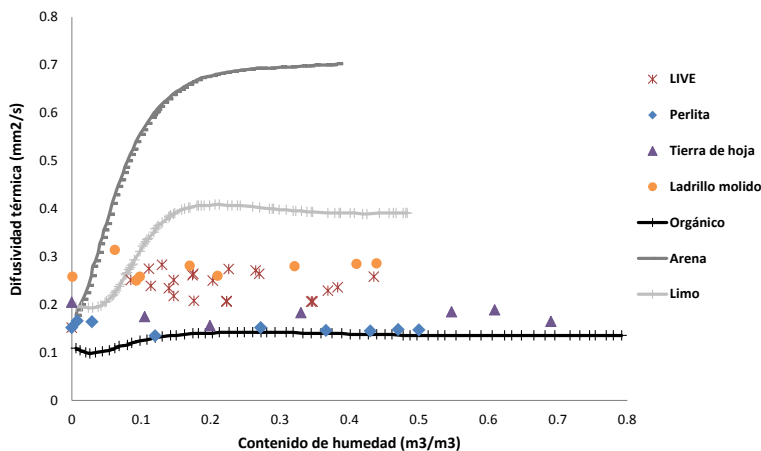


Figura 6. Curvas de difusividad térmica. Puntos: datos experimentales (LIVE, perlita, tierra de hoja y ladrillo). Líneas continuas: valores de referencia para sustratos orgánicos, limo y arena [2].

CONCLUSIONES

En base a los resultados de las propiedades térmicas se deduce que la elección del sustrato puede reducir el flujo de calor conductivo en una cubierta vegetal de manera considerable. Como se observa con el ladrillo, su baja conductividad térmica y alta capacidad calórica volumétrica sugieren que se puede evitar la pérdida de calor de una habitación bajo una cubierta vegetal con este tipo de sustrato. La tierra de hoja tiene un comportamiento similar, pero además presenta alta variabilidad en los valores de capacidad calórica volumétrica, por lo tanto, no se recomienda para este tipo de sistemas. Por otro lado, el sustrato LIVE presenta aumentos muy drásticos en su conductividad térmica.

Además, los valores de difusividad térmica de los sustratos sugieren que estos son más adecuados para cubiertas vegetales que suelos naturales. Fundado en el análisis, se concluye que el ladrillo tiene un comportamiento térmico superior a los demás sustratos estudiados. Sin embargo, se debe recalcar que el flujo de calor también se ve fuertemente influenciado por la vegetación, la cual no ha sido estudiada en esta investigación. Los resultados obtenidos son una primera aproximación para poder diseñar una cubierta vegetal de manera óptima en Chile.

PRINCIPIO CIENTÍFICO UTILIZADO

Las propiedades térmicas de los sustratos se determinaron con una sonda de doble aguja SH-1 conectada a un analizador de propiedades térmicas [9]. La sonda SH-1 se inserta en un medio poroso con una determinada humedad (θ) y luego aplica un pulso de calor en una de sus agujas, mientras que en la otra se monitorea la variación temporal de la temperatura. Esta información es utilizada para encontrar simultáneamente $D(\theta)$ y $C(\theta)$ mediante la resolución de la ecuación de conducción radial de calor [13]. Una vez conocidos $D(\theta)$ y $C(\theta)$, $\lambda(\theta)$ se estima a partir de la siguiente ecuación:

$$\lambda(\theta) = D(\theta) C(\theta)$$

Para medir el θ se utilizó un sensor TDR [10]. Este instrumento utiliza la velocidad de propagación de ondas electromagnéticas a través de un medio poroso para obtener su humedad. A mayor tiempo de viaje de la onda, mayor es el contenido de humedad del medio [14].

GLOSARIO

Cubierta vegetal: Tipo de techumbre que está parcial o totalmente cubierta por vegetación. Se compone de un sustrato artificial y otras capas que dependen del objetivo tecnológico de la cubierta (Figura 1). Se diseñan principalmente para minimizar los impactos de la urbanización.

Sustrato: Medio artificial de crecimiento y vida de plantas o animales.

LIVE: Laboratorio de Infraestructura Vegetal de Edificios; Proyecto apoyado por INNOVA-CORFO 12IDL2-13630. Este se encuentra en el campus San Joaquín de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

Radiación: Emisión de energía de un cuerpo en forma de ondas electromagnéticas.

Calor latente: Energía liberada o recibida por una sustancia cuando cambia su estado. En cubiertas vegetales el calor latente está asociado a la energía requerida para que el agua en el sustrato se evapore. Este componente del flujo de calor ocurre bajo condiciones isotérmicas.

Calor sensible: Energía en forma de calor que recibe un cuerpo que hace que aumente su temperatura sin cambiar de estado.

Calor por conducción: Propagación de calor en un cuerpo por movimiento interno molecular. La existencia de diferencias de temperatura causa la transferencia de energía cinética entre zonas de mayor a menor temperatura [8].

Contenido de humedad: Es la proporción de volumen de agua contenida en una porción de sustrato seco.

Humedad de saturación: Máximo volumen de agua contenido en una porción de sustrato seco.

TDR: Sensor que utiliza la velocidad de propagación de ondas electromagnéticas a través de un medio poroso para obtener su humedad. *Time Domain Reflectometry* es el nombre de la técnica.

Conductividad térmica: Cantidad de calor que se transfiere en una unidad específica de volumen y bajo un gradiente unitario de temperatura. Su valor depende de la composición mineralógica o materia orgánica el sustrato, como también de la fracción volumétrica de agua o aire [8]

Capacidad calórica volumétrica: Calor necesario para aumentar en un grado la temperatura de un volumen unitario de un sustrato [7].

Conservación del flujo de calor: Ecuación que describe el flujo de calor en una unidad de sustrato de referencia. Incluye fenómenos como conducción, advección, expansión térmica o fuentes de calor.

Advección: Transferencia de calor debido al movimiento de un fluido.

Difusividad térmica: Razón entre conductividad térmica y capacidad específica volumétrica [7]. Es una medida de habilidad de un material para conducir energía térmica en relación a su capacidad de almacenarla

Conductividad térmica de un sustrato seco: Conductividad térmica de un sustrato cuando éste tiene un contenido de humedad mínimo.

Densidad aparente: Relación entre el peso de sustrato y el volumen que ocupa.

Mínimos cuadrados: Ajuste de curvas empírica y teórica a través de la minimización de la diferencia entre estas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al señor Camilo Pinto por el apoyo técnico en la medición de las propiedades térmicas. Además, se agradece al proyecto INNOVA-CORFO 12IDL2-13630: “Soluciones integrales de cubiertas vegetales sustentables para edificios comerciales-industriales en climas semiáridos de Chile”, por la posibilidad de colaborar en su proyecto y por facilitar el sustrato analizado; al Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CEDEUS - CONICYT/FONDAP/15110020) por apoyo de laboratorio y por colaborar con beca de investigación para la señorita Victoria Sandoval; y a los proyectos Fondecyt N°1130522: “Impact of salinity and groundwater fluctuations on moisture distribution and non-isothermal water fluxes in soils of arid zones” y Fondecyt N°1131131: “Experimental study of hydrological processes in Chilean urban areas at a residential/lot scale”, que facilitaron la instrumentación para realizar la caracterización térmica de los sustratos.

REFERENCIAS

- [1] Saadatian, O., Sopian, K., Salleh, E., Lim, C. H., Riffat, S., Saadatian, E., Toudeshki, A., Sulaiman, M. Y. A review of energy aspects of green roofs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 23: 155-168, 2013.
- [2] Campbell, G. S. y Norman J. M., An introduction to environmental biophysics. New York, Springer-Verlag: 1–144, 1998.
- [3] Fang, C.F Evaluating the thermal reduction effect of plant layers on rooftops. *Energy Build.*40 (6): 1048–1052, 2008.
- [4] Pompeii II, W. C., Hawkins, T. W. Assessing the impact of green roofs on urban heat island mitigation : a hardware scale modeling approach . *The Geographical Bulletin* 52(1): 52–61, 2011.
- [5] Sailor, D., Hagos, M. An updated and expanded set of thermal property data for green roof growing media. *Energy and Buildings*, 43(9): 2298–2303, 2011.
- [6] Klute, A. Methods of soil analysis, part 1: physical and mineralogical methods. Agronomy Series 9. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, 1994.
- [7] Horton, R., Jury, W. A. Soil physics. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc: 5-199, 2004.
- [8] Hillel, D. Introduction to soil physics. Amherst, Academic P. University of Massachusetts: 155–170, 1982.
- [9] Decagon Devices, Inc. KD2 Pro thermal properties analyzer: operator’s manual. Decagon Devices, Inc. Pullman WA 99163:1-63.
- [10] Decagon Devices, Inc. GS3: Water content, EC and temperature sensors: operator’s manual. Decagon Devices, Inc. Pullman WA 99163: 1-23.
- [11] Chung, S. O., Horton, R., Soil heat and water flow with a partial surface mulch. *Water Resources Research* 23 (12): 2175-2186, 1987.
- [12] Van Rooyen, M., Winterkorn, H.F Structural and textural influences on the thermal conductivity in soils. *Highway Res. Bd. Proc.* 38: 576-621, 1959.
- [13] Bristow, K. L., Campbell, G. S., Calissendorff, C. Test of a heat-pulse probe for measuring changes in soil water content. *Soil Science Society of America Journal* 57: 930-934, 1993.
- [14] Erik, B. Winter soil moisture regime monitored by the time domain reflectometry technique (TDR). *Geogr. Ann* 68 (3): 175-184, 1986.

EQUIPO DE INVESTIGADORES

- 1 Macarena Mazzachiodi
- 2 Victoria Sandoval
- 3 Profesor Francisco Suárez
- 4 Felipe Victorero
- 5 Profesor Carlos Bonilla
- 6 Profesor Jorge Gironás
- 7 Profesor Sergio Vera
- 8 Profesor Waldo Bustamante
- 9 Victoria Rojas
- 10 Profesor Pablo Pastén



1



2



3



4



5



6



7



8



9



10