

# El cálculo de la conductividad térmica equivalente en la cubierta ecológica

*The calculus of the thermal equivalent conductivity of the ecological roof*

**María V. Machado**  
**Celina Britto**  
**Javier Neila**

**María V. Machado**  
Instituto de Investigaciones de  
la Facultad de Arquitectura  
Universidad del Zulia  
Apartado Postal 15399  
Maracaibo, Venezuela  
E-mail: mmpenso@hotmail.com

**Celina Britto**  
Departamento de Construcción  
y Tecnología Arquitectónicas de  
la Escuela Técnica Superior de  
Arquitectura  
Universidad Politécnica de  
Madrid  
Av. Juan de Herrera, 4  
Ciudad Universitaria. 28040  
Madrid, España  
E-mail: celinabritto@redestb.es

**Javier Neila**  
Departamento de Construcción  
y Tecnología Arquitectónicas de  
la Escuela Técnica Superior de  
Arquitectura  
Universidad Politécnica de  
Madrid  
Av. Juan de Herrera, 4  
Ciudad Universitaria. 28040  
Madrid, España  
E-mail:  
fneila@aq.upm.es

**Recebido em 07/05/03**  
**Aceito em 02/01/04**

## Resumen

A través del monitoreo de una cubierta ecológica ubicada sobre el forjado de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos (ETSIA) de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), España, se ha determinado la conductividad térmica equivalente. Para esto se ha formulado una ecuación que establece una relación entre el balance energético de una cobertura vegetal en un medio natural y el balance energético de una cubierta ecológica sobre una edificación. Se han tomado en cuenta la radiación solar absorbida, reflejada, transmitida, evapotranspirada y utilizada en el proceso de fotosíntesis; el flujo de calor convectivo dentro de la capa vegetal; y las transferencias de calor por conducción. Es así entonces como se obtiene una ecuación para el cálculo de la conductividad térmica equivalente de la cubierta ecológica, cuyo resultado ( $0,12 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$ ) ha sido evaluado y comparado con los obtenidos a través del ensayo de una muestra de la misma parcela realizado en el laboratorio de materiales del Ministerio de Fomento de España.

**Palabras claves:** conductividad térmica equivalente, cubierta ecológica, balance energético, radiación solar, material de construcción

## Abstract

*Through the monitoring of an ecological roof located on the building of the Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos (ETSIA) of the Universidad Politécnica de Madrid (UPM), the thermal equivalent conductivity has been determined. An equation that establishes a relationship among the energetic balance of a vegetable coverage in a natural environment, and the energetic balance of an ecological cover on a roof has been formulated. Three important factors have been taken into account: the quantities of absorbed, reflected, transmitted, evapotranspired and used in the photosynthesis process solar radiation; the convective heat flow within the vegetable layer; and the conductivity heat flow. Through this process, an equation for the calculus of the thermal equivalent conductivity of the ecological roof was obtained. The result ( $0,12 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$ ) was evaluated and compared with those obtained through the essay of a sample of the same parcel carried out in the materials laboratory of the Ministerio de Fomento de España.*

**Keywords:** thermal equivalent conductivity, ecological roof, energy balance, solar radiation, construction materials.

## Introducción

La cobertura es la parte del edificio que está sujeta a las mayores fluctuaciones térmicas: durante el día alcanza elevadas temperaturas por su exposición directa a la radiación del sol, y durante la noche es la parte de la construcción que más calor pierde, por radiación, hacia el espacio. Su aislamiento se impone como una medida de prioridad y puede solucionar parte del problema, pero la absorción de la radiación solar por la cubierta, con su consecuente transferencia de calor a sus elementos constituyentes, puede originar fácilmente temperaturas insostenibles.

Para el diseño térmico para las edificaciones es necesario conocer las características ópticas y termofísicas de los materiales. Es por ello que para trabajar térmicamente con las cubiertas ecológicas se hizo necesario determinar los factores desconocidos que se necesitan para realizar el cálculo, como lo son la conductividad térmica equivalente; y el efecto de enfriamiento evapotranspirativo respecto a la radiación durante el día y a la ventilación en el período nocturno, que afecta la temperatura sol-aire de la superficie.

La cubierta vegetal tiene como característica principal el ser un material activo respecto a las condiciones climáticas del sitio donde se encuentre. Esta particular característica es la diferencia fundamental frente a los otros materiales de construcción, ya que éstos no interactúan con el medio, sino que se impregnan de las condiciones circundantes.

El valor de la conductividad térmica para los materiales inertes se obtiene a través de ensayos de laboratorios con equipos que utilizan polos eléctricos para determinarla. En el caso de una superficie o material activo, como es la cubierta vegetal, deben considerarse las interacciones entre ésta y los factores del medio ambiente que la rodean, como temperatura, humedad, radiación solar, precipitación, evapotranspiración, fotosíntesis, etc.

Para el cálculo del flujo del calor, a través de la cubierta ecológica, no existe el valor de la conductividad térmica de la capa vegetal y el sustrato; lo que trae como consecuencia dificultades en el cálculo del flujo de calor a través de este tipo de cubierta y diferencias entre los valores reales y los obtenidos a través de simulaciones.

## Definición

La cubierta ajardinada es un tipo de cubierta invertida con la adición de un sustrato orgánico y plantas por la capa superior. La cubierta ajardinada puede ser extensiva o intensiva. La cubierta ecológica o extensiva tiene una capa vegetal de pocos centímetros de espesor (normalmente menor que 10 cm), con plantas de bajo porte (generalmente autóctonas), con abastecimiento de agua y sustancias nutritivas por procesos naturales. La cubierta ajardinada intensiva, o cubierta jardín, tiene un sustrato de mayor espesor (mayor que 20 cm), plantas, árboles y arbustos de mayor altura y mantenimiento típico de cualquier jardín.

## Características de la cubierta ecológica

Los beneficios de la cubierta ajardinada son múltiples y abarcan tanto aspectos arquitectónico-constructivos como estéticos y medio ambientales.

(a) Actuación positiva en el clima de la ciudad y de la región proporcionada por la retención de polvo y sustancias contaminantes: las plantas llegan a filtrar hasta de las partículas del aire, produciendo, además, oxígeno sin impurezas. La atmósfera se limpia de sustancia nocivas, y la temperatura incrementada por los gases de combustión, por la falta de circulación natural de aire y por la contaminación, disminuiría, con la consiguiente mejora del clima de la región.

(b) Aumento del espacio útil: no hay duda de lo agradable que es una superficie ajardinada. Con la instalación de una cubierta ecológica se aumentaría la superficie verde de las ciudades, que es uno de los problemas urbanos a tener en cuenta, y se podría de alguna manera reponer la superficie verde ocupada por la construcción del edificio.

(c) La influencia que ejerce sobre el ambiente interior: la cubierta ecológica ofrece una gran protección contra la radiación solar. Las hojas, a través de la constante reflexión de las radiaciones, no permiten su penetración en la superficie de la cubierta, y en esto también influyen la textura, la densidad y la altura de las plantas. En la medida en que se protege el punto más vulnerable del edificio, que es la cubierta, se minimizan los flujos energéticos entre ambiente exterior y interior, contribuyendo a una mejora en las condiciones de confort.

(d) Enfriamiento de los espacios bajo cubierta, en el verano, provocado por la evaporación: hay dos tipos de evaporación a considerarse: en primer lugar, la evaporación provocada por la humedad retenida por el sustrato en contacto con la radiación solar; y, en segundo lugar, la evaporación a través de las plantas en su función biológica. La evaporación consume energía que es alejada antes de transmitirse por la cubierta.

(e) Disminución de las pérdidas de calor, en el invierno, lo que presupone ahorro de energía; desde que se pueda mantener más estable la condición de confort interno, obtenido por ganancias pasivas o por sistemas de acondicionamiento, requiriendo consumos más reducidos para alcanzar los niveles de confort estipulados.

(f) Aumento del aislamiento térmico: la diferencia de temperatura que sufren los materiales que conforman una cubierta queda minimizadas con el empleo de un cerramiento vegetal. A esto contribuyen la capa protectora que es la vegetación, el poder aislante del suelo o sustrato orgánico, generalmente de baja conductividad térmica, el aire existente entre las hojas de las plantas y la capa superior del sustrato, que funcionan como una capa aislante que disminuye el intercambio térmico entre la cubierta y el exterior.

(g) La absorción del ruido: en las ciudades se está bajo la influencia de todo tipo de ruidos. En la cubierta tradicional los materiales tienen un poder de reflexión que expanden la onda sonora, sin embargo, tanto las plantas como el sustrato absorben parte de esta onda.

(h) Prolongación del tiempo de vida de la cubierta: al proteger la lámina impermeabilizante de la radiación solar y de los cambios bruscos de temperatura.

(i) Mejora del grado de humedad: al retenerse parte del agua de lluvia en la cubierta.

Sus desventajas disminuyen con el avance de la técnica, pero es importante a la hora de su aplicación tener en cuenta los siguientes aspectos:

(j) el peso cuando se humedece se incrementa aún más, y su aislamiento térmico disminuye debido al contenido de agua, produciendo una deformación en las vigas y un incremento en la conductividad térmica;

(k) los gránulos finos de la capa de sustrato podrían ser arrastrados por la lluvia e infiltrarse en la capa de drenaje, tapándola completamente de

lodo. Con la membrana filtrante, habitualmente un fieltro geotéxtil de aproximadamente  $150 \text{ g/m}^2$ , se evita con toda seguridad este proceso. Los fieltros geotextiles deben ser fabricados de fibras plásticas, normalmente se emplean filtros de fibra de polipropileno o de poliéster;

(l) se pueden utilizar distintos tipos de materiales destinados a ejercer la función de drenaje y/o retención de agua. La capa de drenaje debe ser suficientemente consistente para soportar la carga permanente del sustrato vegetal y la sobrecarga de uso. Por otra parte, la carga debe ser tan ligera como sea posible, a fin de que la sollicitación sobre la estructura soporte sea mínima;

(m) la consideración constructiva más importante a la hora de incorporar la cubierta ecológica en un edificio es proteger la integridad de la cubierta y la estructura que se encuentra debajo de la cubierta. Por ello, el forjado debe ser dimensionado adecuadamente a la sobrecarga que debe soportar, que en cualquier caso es muy reducida. También son importantes detalles constructivos, como por ejemplo, los encuentros entre forjado y elementos de drenaje.

## Composición de la cubierta ecológica y sus variaciones

En general las cubiertas ecológicas son montadas sobre las cubiertas planas. Y constan principalmente por:

(a) una capa vegetal con especies autóctonas, perfectamente adaptadas al clima local y con mínimo o nulo mantenimiento;

(b) un sustrato orgánico o inorgánico de poco espesor, bajo peso, y nutrientes suficientes para el desarrollo vegetativo de las especies;

(c) retenedor de agua en forma de gel, paneles sintéticos o paneles de lana de roca;

(d) bajo el sustrato un fieltro sintético para la retención de las partículas finas del sustrato;

(e) aislamiento térmico opcional dependiendo de las necesidades térmicas del lugar;

(f) una lámina de impermeabilización, generalmente antirraíz;

(g) soporte estructural.

Existe otra variante de la cubierta ecológica, es la cubierta aljibe, que consta de un depósito de agua de lluvia bajo los componentes de la cubierta ecológica descritos anteriormente.

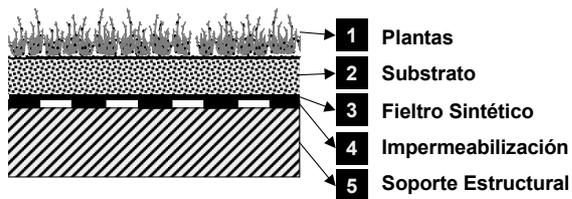


Figura 1 - Cubierta Ecológica sin aislamiento

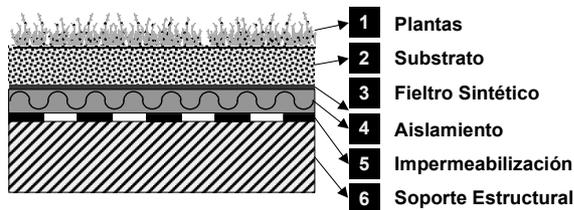


Figura 2 - Cubierta Ecológica con aislamiento



Figura 3 - Cubierta Aljibe

## El clima de la comunidad de Madrid

Madrid está ubicada a 40° latitud norte y a 667 m sobre el nivel del mar. La principal característica del clima de Madrid es la diferencia de temperaturas entre el día y la noche, y las situaciones extremas, ya que presenta inviernos muy fríos y húmedos, y veranos muy cálidos y secos. Así mismo tiene escasez de lluvias, localizadas principalmente en primavera y en otoño, con un promedio de 300 mm. Las temperaturas medias en invierno, correspondientes al mes de enero, oscilan entre los 4 y 6 °C. Durante el verano las temperaturas medias, correspondientes

al mes de julio, van desde los 16 °C hasta los 31,7 °C. La humedad relativa presenta valores entre el 42% y 79% (NEILA; BEDOYA, 1997).

## Muestra: parcela experimental

Para el cálculo de la conductividad térmica equivalente se han utilizado los datos procedentes del proyecto de investigación: “Cubierta ecológica monitoreada e instalada en la terraza de economía de la ETSIA”, ubicada sobre el forjado original del edificio de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos en la Ciudad Universitaria (ETSIA), este proyecto por la Universidad de Berlín en participación con la Universidad Politécnica de Madrid, España.

Entre las once parcelas planas se seleccionó la parcela 8 (Figura 1) para determinar la conductividad térmica equivalente, ya que cubría mayor superficie de la parcela con las plantas. Las dimensiones de la parcela son 2 m x 4,3 m, cubriendo un área de 8,6 m<sup>2</sup>, dentro de la cual se disponen cuatro clases de plantas: *sedum oreganum*, *sedum spurium*, *sedum reflexium* y *sedum album*, de acuerdo a la densidad del follaje y de su resistencia con respecto a los materiales que lo rodean (Figura 2). La selección de varias clases de *sedum* se hace porque eran las especies que mejor se adaptaban a las condicionantes climáticas, substrato, estructura de la cubierta y cobertura de la superficie sin cuidado de ninguna clase.

Las características que reúne esta planta para ser seleccionada en la experimentación son: 1) capacidad para soportar temperaturas extremas; 2) capacidad para soportar grandes períodos sin aportación de agua, por lo cual no deben utilizarse hojas planas, lo que nos indica una escasa resistencia a la sequía del verano, mientras que las hojas más globosas pueden resistir grandes períodos de sequía; 3) desarrollo en la superficie, con suficiente capacidad de crecimiento horizontal para tapizar la cubierta; 4) capacidad de crecer en suelos pocos profundos.

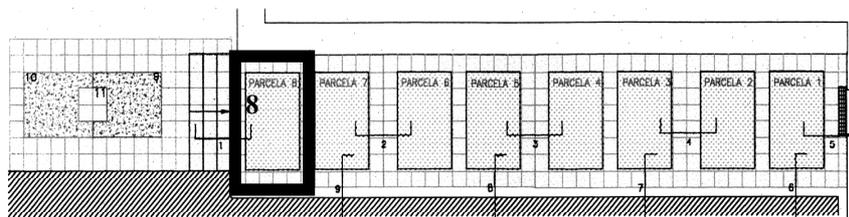


Figura 4 - Planta de la azotea del Edificio de Agrónomos donde se disponen las parcelas

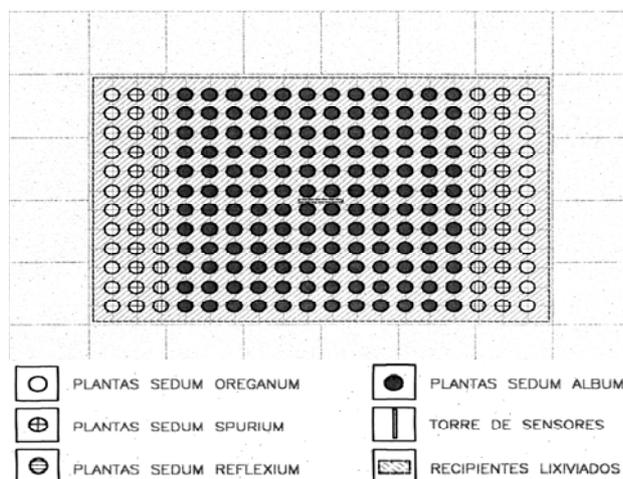


Figura 5 - Plantas de la parcela tipo

Este módulo está compuesto por: una capa de plantas con 10 cm de altura; 8 cm de sustrato compuesto por corteza de pinos mezclada con lodos compostados y un gel retenedor de agua protegidos en la parte superior por un árido artificial; un fieltro de poliéster y una membrana impermeabilizante de PVC. Una placa de hormigón aligerado por la parte superior y poliestireno extruido por la parte inferior funciona como soporte del sustrato. El espacio interior es simulado a través de la creación de la cámara de aire de 10 cm de espesor sobre el forjado del edificio.

Para la elección del tipo de sustrato se tomó en cuenta un mantenimiento prácticamente nulo, por lo cual se seleccionó un sustrato capaz de retener grandes cantidades de agua para que la planta

pueda disponer de ésta durante los grandes períodos de sequía.

El sustrato de lodos compostados está dentro de los sustratos orgánicos, ha sido elaborado a partir de las materias vegetales procedentes de pinos, y, además, está incluido en la categoría de compost. El compostaje es un método de fermentación en presencia del aire que provoca la degradación biológica de la materia prima transformándola en materia orgánica. La aplicación de este compost como abono permite devolver a la tierra parte de la materia que se obtuvo con la vendimia. De esta forma se realiza un aprovechamiento de carbono, nitrógeno, fósforo y potasio, elementos claves del crecimiento vegetativo. Este abono orgánico no contiene elementos tóxicos, ya que la materia procede del mismo proceso en el que se obtiene el vino (DURÁN et al., 1996).

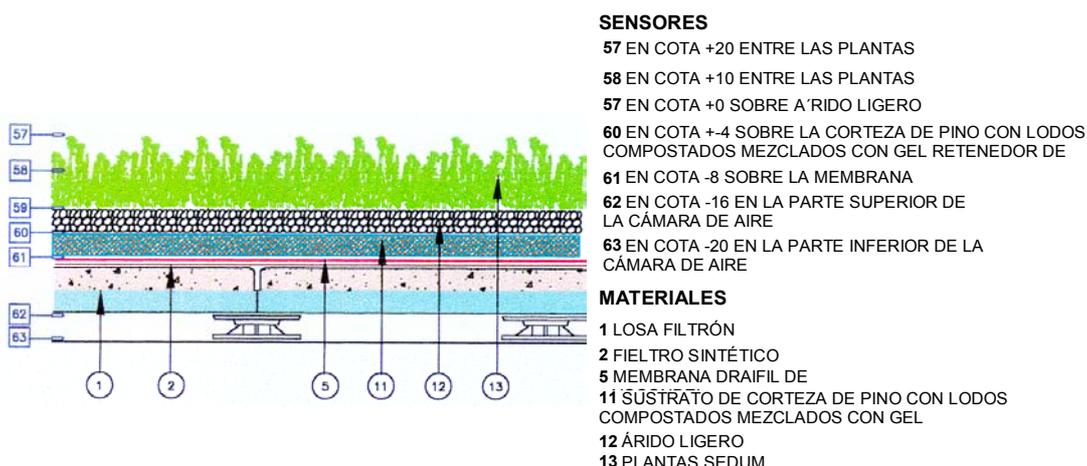


Figura 6 - Cubierta ecológica de la parcela 8 del Edificio de Agrónomos

## Sensores

Con el objetivo de obtener información detallada acerca de las características higrotérmicas de la cubierta, se situaron sensores de temperaturas (DURÁN et al., 1996) entre las distintas capas que componen el sistema de cubierta, y concretamente en tres posiciones específicas: 1) en el forjado del edificio, 2) bajo la capa de aislamiento térmico; 3) en el sustrato.

Para medir la temperatura del suelo y de las capas se han utilizado sensores termorresistivos o RTD, de platino (PT-100) (ver Tabla 1), siendo necesario alimentar el circuito eléctrico que forma parte de él. El método utilizado para la toma de medidas está basado en una determinación directa de tensiones a cuatro hilos, asegurando la estanqueidad frente a la lluvia y a posibles riesgos.

Elemento sensor:	sensor de Platino tipo PT-100
Rango de medida:	-30 °C-70°C
Exactitud a 25 °C:	<+/-0,2% desde -30 a 150°C
Constante de tiempo:	10 segundos en aire
Deriva por temperatura:	10,35 °C/70°C
Salida:	do 0 a 1 V para el rango -30°C a 70°C
Puntos de calibración:	0 y 100°C
Precisión:	0,1°C

Tabla 1 - Aspectos técnicos de los sensores utilizados para la experimentación

## Conductividad térmica equivalente

Para realizar los análisis sobre el comportamiento térmico de modelos a través del ordenador y comprobar los datos obtenidos en una experimentación es necesario tener a disposición los valores de las características térmicas de los materiales, tales como conductividad térmica, absorptividad, emisividad, difusividad, efusividad, calor específico y densidad.

El valor de la conductividad térmica para los materiales inertes se obtiene a través de ensayos de laboratorios con equipos que utilizan dos polos eléctricos para determinarla. En el caso de una superficie o material activo, como es la cubierta vegetal, deben considerarse las interacciones entre ésta y los factores del medio ambiente que la rodean, como temperatura, evapotranspiración, humedad, radiación solar, precipitación, fotosíntesis, etc.

El cálculo de la conductividad equivalente condujo

hacia la formulación de tres ecuaciones, utilizando los datos provenientes del monitoreo de la parcela 8 del edificio de la ETSIA – UPM.

La *primera formulación* se obtuvo comparando la resistencia térmica de los materiales que componen la cubierta con capa vegetal más el sustrato, y la cubierta sin capa vegetal; y la diferencia de temperatura existente entre la capa exterior e interior. Esta fórmula arrojó resultados diferentes para las distintas horas del día, ya que dependían de la variación de la diferencia de temperaturas.

$$R_{sv}/(T_e - T_i) = R_{cv}/(T_e - T_i) \quad (1)$$

$$R_{cv} = [R_{sv} (T_e - T_i)] / (T_e - T_i) \quad (2)$$

En la *segunda formulación* se realizó una comparación entre: el flujo de calor por conducción de: la cubierta con capa vegetal más el sustrato de lodos compostados; la capa vegetal y el sustrato; y una cubierta sin capa vegetal, pero con los mismos materiales que la primera. Los resultados obtenidos diferían hora a hora debido a la variación de la diferencia de temperatura y a la ausencia de los factores que intervienen en su intercambio con el medio.

$$Q_{ccv} - Q_{cv+sub} = Q_{cvs} \quad (3)$$

La *tercera formulación* considera el balance energético entre la cubierta ecológica y el medio ambiente que la rodea. En ésta la conductividad térmica se realiza a partir de la comparación entre el comportamiento energético de una cobertura vegetal sobre un prado con el medio que la rodea y los flujos de calor existentes en una cubierta verde sobre un edificio, considerando que la temperatura superficial en la vegetación es la misma para ambos casos. Esto permite formular una ecuación que toma en cuenta:

(a) el balance energético entre las condiciones exteriores y la cobertura vegetal (CASTILLO, 1996), cuyos factores son el albedo, la radiación, la temperatura superficial, la temperatura del aire, la emisividad y la nubosidad. Se calculó mediante la ecuación de la radiación neta propuesta por Francisco Elias Castillo en su libro de Agrometeorología; es la radiación que utiliza la planta para realizar sus procesos vitales. Los factores o flujos que intervienen en el balance de la radiación en las proximidades de la superficie del suelo se expresan mediante la siguiente ecuación:

$$R_n = (1 - R) I_0 + R_L \quad (4)$$

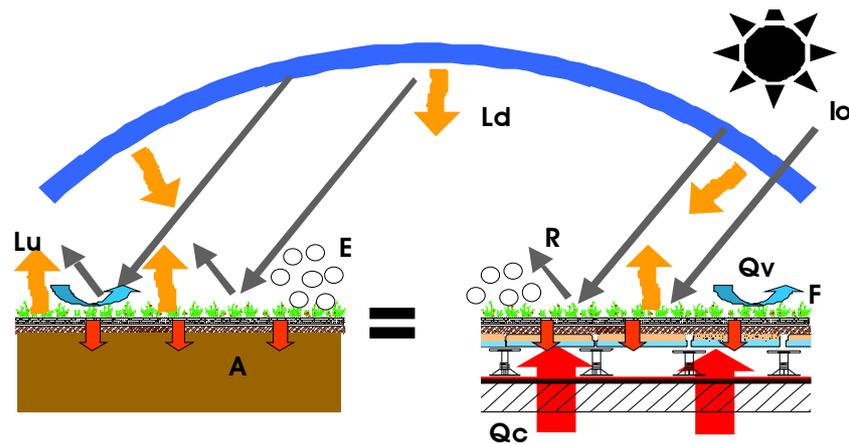


Figura 7 - Proceso de intercambio de calor entre la cubierta y el medio

$$R_n = (1-R) I_0 + [CD(1 + \alpha * C) - (\epsilon * \sigma * T_{sv}^4)] \quad (6)$$

(b) la evapotranspiración horaria de las parcelas del edificio de Fitotecnia de las Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de la Universidad Politécnica de Madrid se determinó mediante la ecuación de Penman y Monteith (MONTEITH y UNSWORTH, 1990), utilizando los datos provenientes del monitoreo de las parcelas ubicadas en la cubierta de este edificio. La ecuación utilizada viene expresada de la siguiente forma:

$$LE = \{ \Delta(R_n - G) + \rho C_p [(e_s - e) / r_h] \} / (\Delta + \gamma^*) \quad (7)$$

(c) La resistencia aerodinámica fue calculada por la ecuación propuesta por Allen y col en 1989 (ALLEN, 1989):

$$r_h = \ln \{ [(z-d)/z_m] * [(z-d)/z_h] \} / (k^2 * U_z) \quad (8)$$

(d) La altura del desplazamiento y el coeficiente de rugosidad para la transferencia del momento fueron calculados utilizando el método de J. G. Arnold y col, en 1997 (ARNOLD et al., 1997):

$$d = 0,0702 * a_f^{0,979} \quad (9)$$

$$z_m = 0,0131 * a_f^{0,997} \quad (10)$$

(e) La constante psicrométrica se calculó mediante el método propuesto por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, 1989):

$$\gamma^* = \gamma^* [1 + (rc/r_h)] \quad (11)$$

$$rc = 2 * (rs/Lt) \quad (12)$$

Calor específico del aire	1180
Densidad del aire	12
Resistencia de la cubierta vegetal	15
Resistencia estomática	15
Índice de área foliar	2
Altura de la velocidad del viento	10
Desplazamiento del plano "0"	7
Coefficiente de rugosidad	0,2
Coefficiente de rugosidad para el agua	0,04
Constante de difusión turbulenta Von Karman	0,41

Tabla 2 - Valores de las constantes en el cálculo de la evapotranspiración

(f) La transferencia de calor por convección entre el aire exterior y la masa de aire que se encuentra en el interior de la capa vegetal, expresada a través de la siguiente ecuación:

$$Q_v = A * hc * (T_e - T_{iv}) \quad (13)$$

(g) La transmisión de calor de los materiales que conforman la cubierta del edificio, para la cual se realizó una aplicación directa de la Ley de Fourier Ec. (9).

$$Q_c = A * U * (T_e - T_i) \quad (14)$$

$$Q_c = 1 * [1/R_{si} + R_m + (e/\lambda)] * (T_e - T_i) \quad (15)$$

Estos cuatro procesos y los datos experimentales obtenidos en la parcela permiten formular la ecuación 16 de balance térmico para la cubierta ecológica, de la cual se obtiene el valor más preciso para la conductividad térmica equivalente.

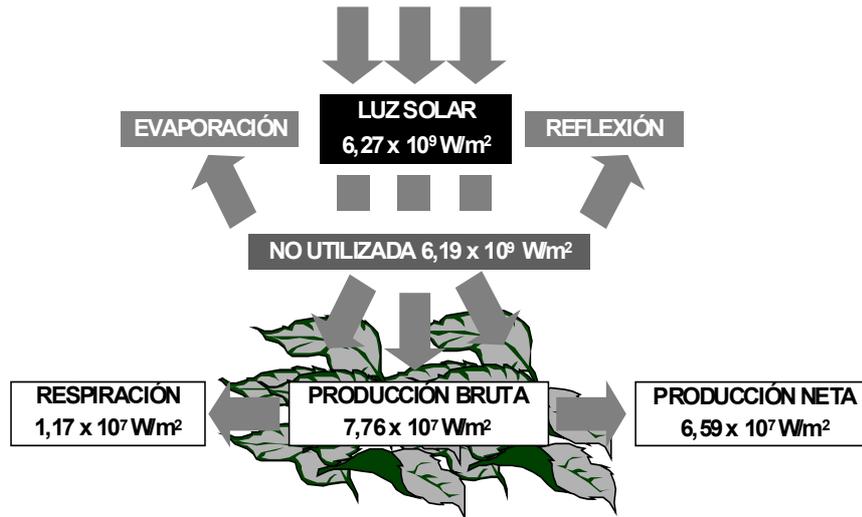


Figura 8 - Procesos biológicos en la vegetación producto de la luz solar (JOHN, 1970)

$$\lambda = \frac{\left\{ \frac{\{[(1-R) \cdot lo] + RL\} - 20\%E - 5\%F \pm [A \cdot hr \cdot (te - tiv)]}{(tsv - ti)} \right\} \cdot e}{1 - (Rsi + R\sum m) \cdot \left\{ \frac{\{[(1-R) \cdot lo] + RL\} - 20\%E - 5\%F \pm [A \cdot hr \cdot (te - tiv)]}{(tsv - ti)} \right\}} \quad (16)$$

## Discusión de los resultados

Con la ecuación del balance energético entre la cubierta ecológica y el medio se calcularon los valores horarios de conductividad térmica para un período de 24 horas con los datos experimentales para un día tipo del mes de marzo, el 28 de julio como el día más caliente del año 1997 y el 2 de enero como el día con las menores temperaturas del 97; suministrados a través del sistema computarizado de monitorización que recolecta los datos minuto a minuto, cuyo valor horario corresponde al cálculo del valor medio de cada una de las horas recolectadas. Esto arrojó como resultados para los tres días elegidos un valor de 0,12 W/m °C (Tabla 1); existiendo variaciones del valor después del cuarto decimal, porque los valores de temperatura, radiación solar, evapotranspiración y fotosíntesis no son los mismos para los tres días analizados.

Para comprobar la efectividad de estos valores se realizó un cálculo con la tabla de evolución de las temperaturas internas (NEILA; BEDOYA, 1997), con el área y los materiales de la parcela experimental, donde se estableció una comparación entre los valores de temperatura de la capa más interna de la cubierta y el coeficiente de estabilidad térmica, entre los datos experimentales de la parcela 8 y los arrojados por el cálculo de la tabla.

Hora	Mes		
	Enero	Marzo	Julio
0	0,1224634	0,1224584	0,1224634
1	0,1224661	0,1224583	0,1224612
2	0,1224628	0,1224581	0,1224619
3	0,1224627	0,1224580	0,1224600
4	0,1224625	0,1224579	0,1224592
5	0,1224619	0,1224578	0,1224591
6	0,1224611	0,1224578	0,1224589
7	0,1224605	0,1224577	0,1224588
8	0,1224606	0,1224578	0,1224593
9	0,1224608	0,1224582	0,1224612
10	0,1224611	0,1224598	0,1224763
11	0,1224618	0,1224626	0,1224211
12	0,1224652	0,1224660	0,1224533
13	0,1224699	0,1224797	0,1224567
14	0,1224937	0,1224279	0,1224583
15	0,1224317	0,1224409	0,1224586
16	0,1224296	0,1224454	0,1224587
17	0,1225001	0,1224412	0,1224587
18	0,1224911	0,1225257	0,1224588
19	0,1224858	0,1224659	0,1224588
20	0,1224764	0,1224462	0,1224589
21	0,1224807	0,1224601	0,1224561
22	0,1224803	0,1224594	0,1224706
23	0,1224794	0,1224590	0,1224660

Tabla 3 - Valores de conductividad térmica obtenidos a través de la ecuación del balance energético de la cubierta vegetal

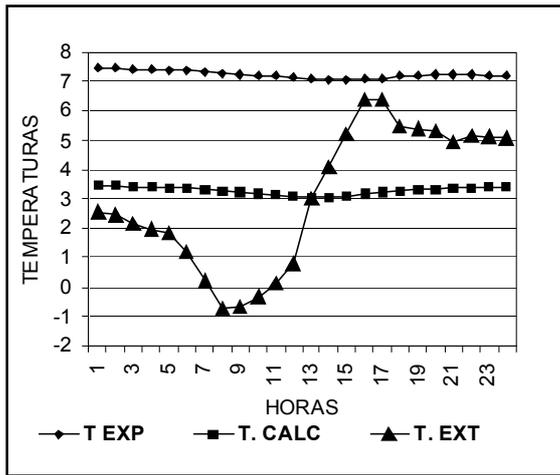


Figura 9 - Comparación entre los datos experimentales y los datos obtenidos con la tabla de evolución de temperaturas para un día tipo del mes de enero

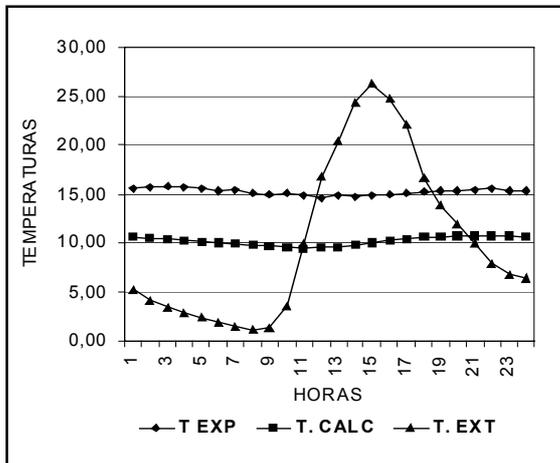


Figura 10 - Comparación entre los datos experimentales y los datos obtenidos con la tabla de evolución de temperaturas para un día tipo del mes de marzo

Como puede observarse en la tabla los valores de temperatura interior procedentes de la experimentación, difieren en 3 °C ó 4 °C de los datos obtenidos de la tabla de evolución de las temperaturas, ya que debajo de la capa de materiales más interna de las cubiertas experimentales se encuentra un forjado que cubre un espacio acondicionado durante todo el año, generando mayores temperaturas durante los meses más fríos y menores temperaturas durante los meses más cálidos. En cuanto a la estabilidad térmica se observan valores muy parecidos entre los dos resultados obtenidos, quedando demostrada de esta manera la efectividad del valor de la

conductividad térmica obtenido a través de la ecuación del balance energético.

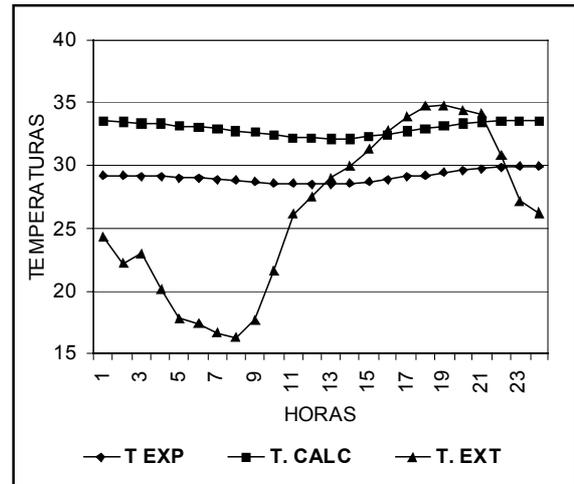


Figura 11 - Comparación entre los datos experimentales y los datos obtenidos con la tabla de evolución de temperaturas para un día tipo del mes de julio

Para comprobar la veracidad de la ecuación utilizada para el cálculo de conductividad térmica equivalente se realizaron ensayos de laboratorio por el Ministerio de Fomento de España, para determinar la conductividad térmica del sustrato.

Características del ensayo:

**Normas de ensayo:** UNE 92202-89, correspondiente a: Materiales aislantes térmicos, Determinación de la conductividad térmica. Técnica del Medidor de Flujo de Calor, método asimétrico.

**Material ensayado:** Sustrato experimental tipo 1 (SET-1)

**Dirección del flujo de calor:** vertical ascendente

**Dimensiones reales de las probetas de ensayo:** 520 mm x 520 mm

**Espesor real de la probeta de ensayo:** 65 mm

Este ensayo se hizo con una muestra de sustrato compuesto por corteza de pinos mezclada con lodos compostados denominado SET-1, arrojan un valor de 0,192 W/mK, para el sustrato con humedad de 65% y 0,065 W/mK para un sustrato seco; el resultado arrojado por la ecuación calculada en base a los datos experimentales fue de 0,12 W/mK, y con estos valores arrojados por el ensayo queda validada la ecuación, ya que para su elaboración se utilizaron valores de humedad que oscilan entre el 40% y 50% para el periodo estudiado; si se calcula el valor medio de la

Substrato Experimental Tipo 1 (Set 1)	Temperatura °C			Conductividad Térmica (W/mk)
	Cara Caliente	Cara Fría	Media	
En estado húmedo 65%	26,1	9,6	17,9	0,192
En estado seco	28	9,5	18,8	0,065

Tabla 4 - Resultados del análisis de la muestra de substrato ensayada en laboratorio

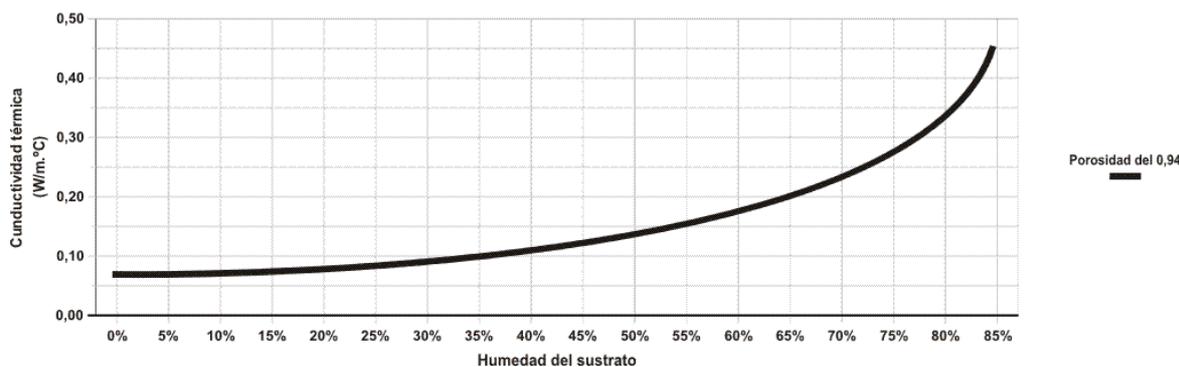


Figura 12 - Conductividad del SET 1 en función de la humedad (Elaboración: Javier Neila)

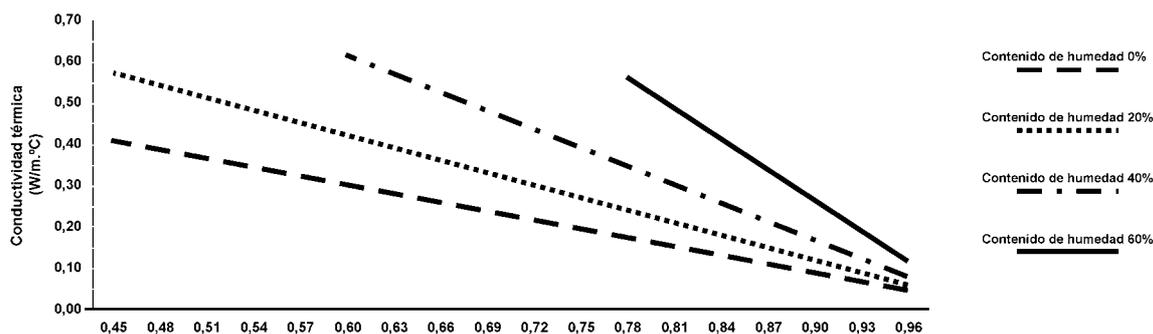


Figura 13 - Conductividad del SET 1 en función de la porosidad (Elaboración: Javier Neila)

conductividad resultante de ambos ensayos, se obtiene un valor de 0,1285 W/mK, lo que muestra una diferencia de 0,0085, una cifra despreciable a la hora de hacer los cálculos térmicos en la edificación.

A continuación se muestra una tabla con los resultados obtenidos.

## Conclusiones

A través de la investigación se demuestra que es posible calcular la conductividad térmica de la capa vegetal más el substrato utilizando los datos experimentales y las interacciones que tiene ésta con su medio.

El resultado obtenido será de gran utilidad para la realización de las simulaciones del

comportamiento en las edificaciones que utilicen la cubierta ecológica como parte de la envolvente, ya que se ha obtenido un valor necesario para la realización de estos cálculos, con lo que se incrementará la precisión de los resultados arrojados en las simulaciones.

## Referencias

ALLEN, R.; JENSEN, M.; WRIGHT, J.; BURMAN, R. Operational Estimates of Reference Evapotranspiration. *Agronomy Journal*, v.81, p.605-662, 1989.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTMC177-97**: Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of

the Guarded-Hot-Plate Apparatus. West Conshohocken, 1997.

ARNOLD, J.; WILLIAMS, J.; SRINIVASAN, R.; KING, K. **Evapotranspiration**: User Manual. SWAT. Blackland Research Center. Texas A&M University System. EE UU, 1997. Disponible en: <<http://www.brc.tamus.edu/swat/usermanual/evapotrpiration.html>>.

BRIZ, J. **Naturación urbana**: cubiertas ecológicas y mejora al medio natural. España: Mundi Prensa, 1999.

CASTILLO, F.E. **Agrometeorología**. Madrid: Mundiprensa, 1996.

DURÁN, J.M.; NAVAS, L.M.; MUÑOZ, M.A.; GARCÍA, F. Sistemas de Adquisición y análisis de datos para cubiertas ecológicas. **Agricultura**, Revista Agropecuaria, v.773, p.1048-1046, 1996.

EPINATJEFF, P. **Klimagerechtes Planen Und Bauen**. Lecture Series Modul 12, Technical University Berlin, 1983.

FAO. **Manual for Cropwat**. Preliminary version. Roma, 1989.

[INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. ISO 8302: Thermal insulation: determination of steady-state thermal resistance and related properties. Guarded hot plate apparatus, 1991.](#)

JOHN, P. **Ecología energética**. Barcelona: Omega, 1970.

MONTEITH, J.L.; UNSWORTH, M.H. **Principles of Environmental Physics**. 2nd Edition. Edward Arnold, 1990.

NEILA, F.J.; BEDOYA, C. **Técnicas arquitectónicas y constructivas de acondicionamiento ambiental 1**. Madrid: Munilla-Lería, 1997.

UNE 92202-89. **Materiales aislantes térmicos**. Determinación de la conductividad térmica. Técnica del Medidor de Flujo de Calor, método asimétrico, 1989.

## Nomenclatura

**Rsv**: Resistencia de la cubierta sin vegetación.

**Rcv**: Resistencia de la cubierta con vegetación.

**Qc<sub>cv</sub>**: Flujo de calor presente en la cubierta con capa vegetal y substrato.

**Qc<sub>v+sub</sub>**: Flujo de calor dentro de la capa vegetal y el substrato.

**Qc<sub>sv</sub>**: Flujo de calor en la cubierta sin capa vegetal.

**Rn**: Radiación neta sobre la cubierta vegetal, W.

**R**: Albedo, con un valor de 0,2 para la cubierta vegetal.

**I<sub>o</sub>**: Radiación solar incidente (directa + difusa), tomada a partir de los datos experimentales de la parcela, W.

**RL**: Radiación de onda larga definida por Ld-Lu, W.

**Ld**: Radiación de onda larga descendente de la atmósfera.

**Lu**: Radiación de onda larga emitida por la vegetación.

**CD**: Valor estimado para un cielo despejado.

**α**: Factor que depende de la altura de las nubes; nubes bajas (0,8 – 0,9), nubes medias (0,6 – 0,7) y cirros (0,2).

**C**: Fracción de nubes.

**ε**: Emisividad de onda larga; 0,9.

**σ**: Constante de Stefan-Boltzman;  $5,67 * 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ .

**Tsv**: Temperatura superficial de la cobertura vegetal en K.

**Qv**: Flujo de calor por convección dentro de la capa vegetal, W.

**A**: Área.

**hc**: Coeficiente convectivo para un flujo de aire en régimen turbulento;  $hc=1,52*(Te-Tiv)^{0,33}$ .

**Tiv**: Temperatura del aire dentro de la capa vegetal, K.

**Qc**: Flujo de Calor por Conducción, W.

**A**: Área, m.

**Rsi**: Resistencia superficial interna de la cubierta,  $\text{m}^2 \text{ K/W}$ .

**RΣm**: Resistencia de los materiales de la cubierta del edificio que están debajo de la capa vegetal y el substrato  $\text{m}^2 \text{ K/W}$ .

**e**: Espesor de la capa vegetal más el substrato, m.

**λ**: Conductividad térmica de la capa vegetal más el substrato,  $\text{W/mK}$ .

**Te**: Temperatura seca del aire exterior, K.

**Ti**: Temperatura interior, medida en la capa más interna de la cubierta del edificio, K.

**LE:** Calor latente de evapotranspiración  $w/m^2$ .  
**G:** Flujo de calor en el suelo  $w/m^2$ .  
 **$\rho$ :** Densidad del aire  $Kg/m^3$ .  
**cp:** Calor específico del aire  $J/Kg\ ^\circ C$ .  
 **$e_s$ :** Presión de vapor de saturación kPa.  
**e:** Presión de vapor kPa.  
 **$r_h$ :** Resistencia de la cubierta vegetal.  
 **$\Delta$ :** Pendiente de la curva de presión de saturación.  
 **$\gamma^*$ :** Constante psicrométrica.  
**z:** Altura a la que se mide la velocidad del viento.

**d:** Altura del desplazamiento del plano cero.  
**zm:** Coeficiente de rugosidad para la transferencia del momento.  
**zh:** Coeficiente de rugosidad del vapor de agua.  
**k:** Constante de Von Karman para la difusión turbulenta, 0,41.  
**Uz:** Velocidad del viento a la altura z.  
**af:** Altura del follaje.  
**rc:** Resistencia de la cubierta vegetal.  
**rs:** Resistencia estomática, 1,5.  
**Lt:** Índice de área foliar, 4.