

Cálculo de la evapotranspiración en un bosque boreal

J. M. Sánchez¹, V. Caselles¹, R. Niclós¹ y T. Laurila²

Correo electrónico: JuanManuel.Sanchez@uv.es

¹*Departamento de Termodinámica, Facultad de Física, Universitat de València, C/Dr. Moliner, 50, 46100 Burjassot*

²*Finish Meteorological Institute, Air Quality Research, Sahaankatu 20E, FIN-00880, Helsinki*

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es mostrar un método operativo para la determinación de la evapotranspiración en un bosque boreal mediante datos de teledetección. El propósito concreto es estimar la resistencia aerodinámica que debemos utilizar en la ecuación de balance de energía con tal fin. Como resultado, hemos obtenido dicho valor ($32,3 \pm 1,6 \text{ s m}^{-1}$) y lo hemos comparado con valores de diferentes bosques dados en la bibliografía.

PALABRAS CLAVE: bosque boreal, temperatura de cultivo, resistencia aerodinámica, evapotranspiración, flujo de calor.

ABSTRACT

The objective of this paper is to show an operational method for determining evapotranspiration in a boreal forest using remote sensing data. The specific purpose is to estimate the aerodynamic resistance to be used in the energy-balance equation. As a result, we have obtained this value for a boreal forest, ($32,3 \pm 1,6 \text{ s m}^{-1}$). It was also compared with values for different forest given in the bibliography.

KEY WORDS: boreal forest, canopy temperature, aerodynamic resistance, evapotranspiration, heat flux.

INTRODUCCIÓN

Uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta en estudios sobre hidrología o climatología, es la determinación de la evapotranspiración. Haciendo un breve resumen de los distintos modelos desarrollados, encontramos los modelos de una capa (para cultivos homogéneos) y los de dos capas (para cultivos con vegetación dispersa). En este trabajo nos centraremos en el segundo grupo de modelos.

Este estudio, además, tiene como marco el proyecto SIFLEX-2002 (Solar Induced Fluorescence Experiment-2002), financiado por la Agencia Espacial Europea (ESA), cuya campaña de medidas se llevó a cabo entre los meses de Abril a Junio de 2002 en Sodankylä, en una región de bosque boreal del norte de Finlandia.

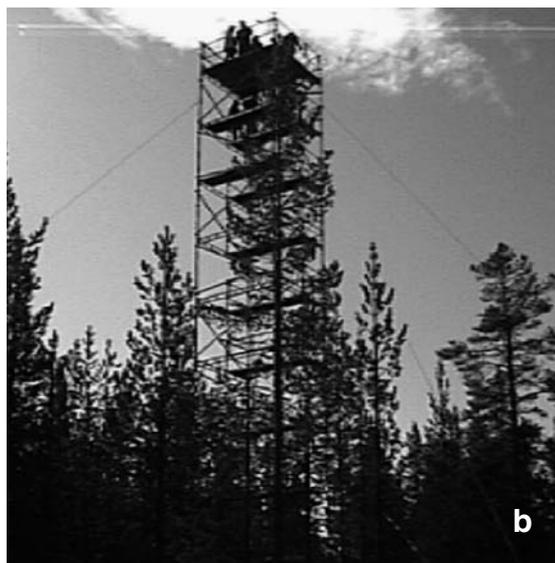
ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio fue el Artic Research Centre, centro perteneciente al Instituto Meteorológico

Finlandés situado en Sodankylä, 100 km al norte del Círculo Ártico. Se trata de una zona de bosque boreal, con pinos (*Pinus sylvestris L.*) de más de 10 m de altura y con una antigüedad media de 100 años (Figura 1, a).

La temperatura de los pinos se midió mediante un radiómetro multicanal infrarrojo térmico de la casa CIMEL Electronique (modelo CE312), situado sobre una torre de 20 m construida con este objetivo (Figura 1, b). Mientras que los diferentes flujos y la temperatura del aire se midieron sobre una torre meteorológica a 23 m de altura, mediante un anemómetro Solent Sonic y un indicador de temperatura Vaisala HMP 45, respectivamente. Por su parte, la temperatura del suelo se midió a 2 cm de profundidad a través de un termopar.

En el siguiente apartado describiremos el modelo propuesto para el cálculo de la resistencia aerodinámica a partir de los valores de flujos y diferencia de temperaturas entre la superficie y el aire.



* **Figura 1.** (a) Área de estudio, (b) Torre de medidas

MODELO PROPUESTO

La ecuación de balance de energía, que modeliza un sistema formado por la vegetación, el suelo que la circunda y la atmósfera que rodea a ambos, se puede expresar de la forma:

$$R_n + G + H + LE = 0 \quad (1)$$

donde R_n es el flujo de radiación neta (W/m^2), G el flujo geotérmico (W/m^2), H el flujo de calor sensible (W/m^2) y LE es el flujo de calor latente en la capa límite de la atmósfera (W/m^2). Éste último es el producto de la masa de vapor de agua evaporada, E (kg), y el calor latente de vaporización de agua por unidad de masa, L ($W/m^2 \text{ kg}$). El flujo de radiación neta se puede medir directamente y el de calor sensible se puede obtener fácilmente a partir de una diferencia de temperaturas entre dos puntos dados, en cambio, la determinación de la evapotranspiración es más complicada.

Podemos suponer, por analogía con la ley de Ohm, que la diferencia de temperaturas entre esos dos puntos de referencia representan una diferencia de potencial entre dos puntos cualesquiera de un conductor. De esta forma, H haría el papel de la corriente eléctrica, con lo que podemos definir una resistencia aerodinámica, que modelizará la relación que exista entre el flujo de calor sensible y la

diferencia de temperaturas entre los dos puntos elegidos. Si tomamos como puntos de referencia la altura a la que se toman los datos meteorológicos, en concreto la temperatura del aire, T_a , y por otro lado, un punto de la superficie del cultivo, que presentará una temperatura T_c , podemos escribir dicho flujo como (Brown y Rosenberg, 1973):

$$H = \rho C_p \frac{T_c - T_a}{r_a} \quad (2)$$

donde ρ es la densidad del aire (kg/m^3), C_p es calor específico del aire ($J/kg \text{ K}$) y r_a la resistencia aerodinámica (s/m).

Pero si trabajamos con vegetación no homogénea, como es nuestro caso, la temperatura observada por el satélite va a depender de la proporción de vegetación, así como de las temperaturas de las dos fuentes establecidas, de forma que podemos escribir esta temperatura radiativa, en una primera aproximación, como (Caselles et al., 1992):

$$T_{rad} = T_c P_v + T_s (1 - P_v) \quad (3)$$

donde T_s es la temperatura del suelo y P_v es la proporción de vegetación.

Por analogía con la ecuación (2), podemos poner ahora:

$$H = \rho C_p \frac{T_{rad} - T_a}{r_a^*} \quad (4)$$

Todas las figuras precedidas de asterisco se incluyen en el cuadernillo anexo de color

donde r_a^* es la resistencia aerodinámica “equivalente” (s/m), que depende de las resistencias que aparezcan en el sistema.

De acuerdo con el modelo de resistencias en paralelo propuesto por Norman et al. (1995), el flujo de calor, H , presenta dos contribuciones, ya que el flujo de calor correspondiente al suelo, H_s , se produce en paralelo con el proveniente de las hojas del cultivo, H_c , de manera que podemos escribir:

$$H_c = \rho C_p \frac{T_c - T_a}{r_a} \quad (5)$$

$$H_s = \rho C_p \frac{T_s - T_a}{r_a^a + r_a^s} \quad (6)$$

donde r_a^a es la resistencia aerodinámica a la transferencia de momento (s/m) y r_a^s es la resistencia aerodinámica entre la superficie del suelo y el sumidero de momento en la vegetación (s/m).

Penman y Long (1960) propusieron la siguiente expresión para calcular la resistencia aerodinámica, r_a^a , en condiciones de atmósfera neutra:

$$r_a^a = \frac{\left[\ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right) \right]^2}{k^2 u} \quad (7)$$

donde z es la altura de referencia (m), z_0 es el parámetro de rugosidad (m), d es la altura del plano de desplazamiento cero (m), k es la constante de von Karman ($\sim 0,41$), y u es la velocidad del viento (m/s) medida a la altura z .

Si trabajamos a escala diaria, el flujo geotérmico se puede despreciar, y si, además tenemos en cuenta que $H_d/R_{nd} = H_i/R_{ni}$ (Itier y Riou, 1982), la ecuación (1) se puede simplificar como:

$$LE_d = R_{nd} + B(T_a - T_s)_i \quad (8)$$

donde los subíndices i y d representan valores instantáneos y diarios al mediodía, respectivamente. El coeficiente B se puede definir como un “coeficiente de intercambio” ($W/m^2 K$) que viene pesado por el cociente R_{nd}/R_{ni} y que expresa la contribución relativa de la radiación neta al mediodía cuando se integra el intercambio radiativo global. Dicho coeficiente viene, pues, dado por (Seguin e Itier, 1983):

$$B = \frac{R_{nd}}{R_{ni}} \frac{\rho C_p}{r_a^*} \quad (9)$$

Para días claros, estos autores encontraron, a partir de datos de tres años, un valor para la relación $R_{nd}/R_{ni} = 0,30 \pm 0,03$. De esta forma sólo necesitamos conocer el valor de r_a^* para obtener la evapotranspiración diaria de una zona concreta.

RESULTADOS

Según la ecuación (4), la forma de calcular r_a^* será realizando un ajuste lineal del flujo de calor sensible, H , frente a la diferencia de temperaturas $T_{rad} - T_a$; éste dependerá de la velocidad del viento y puede variar en un factor 6 dependiendo del tipo de cultivo (desde hierba hasta árboles).

Otra cuestión a tener en cuenta es que mientras que las temperaturas del aire, T_a , y del suelo, T_s , se miden de forma directa, la temperatura del cultivo, T_c , se obtiene de una forma indirecta a partir de medidas de radiancia. Las medidas fueron tomadas cada 15 minutos mediante el radiómetro de infrarrojo térmico CIMEL CE 312. Los valores de radiancia medidos, L_i , se componen de dos contribuciones principales: (1) la emisión directa del cultivo, y (2) la reflexión de la radiación atmosférica descendente, de forma que L_i , según la ecuación de transferencia radiativa, se expresa como:

$$L_i = \epsilon_i B_i(T_c) + (1 - \epsilon_i) L_{Si}^\downarrow \quad (10)$$

donde $B_i(T_c)$ es la función de Planck para una temperatura T_c para el canal i ; ϵ_i es la emisividad efectiva de la superficie; y L_{Si}^\downarrow es la radiación atmosférica descendente. La determinación de T_c requiere, pues, la estimación tanto de la radiación atmosférica descendente, como de la emisividad (Niéls et al., 2003).

Una vez hemos calculado los valores de T_c , y disponiendo de medidas de T_s y T_a , ya podemos obtener T_{rad} (tomando para la porción de vegetación un valor de $P_v = 0,38$, determinado para nuestra zona experimental) y consecuentemente las diferencias $T_{rad} - T_a$. Para el cálculo de la resistencia aerodinámica hemos tomado los valores comprendidos entre las 12 y 14 horas. El resultado final, que se puede apreciar en la Figura 2, es el siguiente:

$$H_i = (37,4 \pm 1,9)(T_{rad} - T_a)_i + (-23 \pm 11) \quad (11)$$

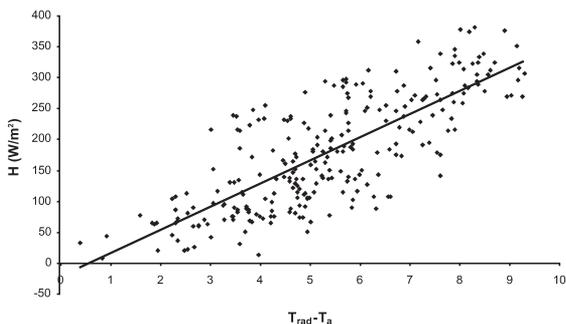


Figura 2. Ajuste lineal del flujo de calor sensible, H , frente a la diferencia de temperaturas, $T_{rad}-T_a$

con un coeficiente de correlación de $r=0,78$. De acuerdo con la ecuación (4), ya podemos extraer el valor de la resistencia aerodinámica, r_a^* , para el bosque boreal. Para ello hemos asumido para las condiciones de la zona unos valores de $\rho=1,20 \text{ kg m}^{-3}$ y de $c_p=1006,25 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$. Con todo esto obtenemos un valor de:

$$r_a^* = 32,3 \pm 1,6 \text{ s m}^{-1}$$

Por otro lado, a partir de la ecuación (7) obtenemos también el valor de r_a^a . Para ello seguimos la línea de algunos autores como Savage et al. (1996), que aceptan para bosque valores de $d=2h/3$ y $z_0=h/10$, donde h es la altura de los árboles (en nuestro caso $h=11\text{m}$).

En cuanto a la altura de referencia z , la situamos en los 23 m.

La media de la velocidad del viento para el intervalo horario considerado y a esa altura es de $u=3,4 \pm 0,5 \text{ m/s}$. Obtenemos con esto un valor de:

$$r_a^a = 12,5 \pm 1,8 \text{ s m}^{-1}$$

En la mayoría de los trabajos realizados hasta ahora sobre bosque, el interés se centra principalmente en la obtención del valor de r_a^a , restando importancia al cálculo de r_a^* y sobre todo de r_a^s . En la Tabla 1 se muestran algunos parámetros característicos para otros bosques recopilados de la bibliografía, así como los valores de r_a^a obtenidos a partir de ellos y asumiendo las mismas condiciones que en nuestra experiencia particular ($z=23 \text{ m}$ y $u=3,4 \text{ m/s}$). Analizando la Tabla 1, vemos como el valor de r_a^a varía mucho según el tipo de bosque considerado.

En cuanto al valor de r_a^a que hemos obtenido para nuestro bosque boreal, no se aleja demasiado del valor medio para los distintos tipos de bosque ($14,5 \text{ s m}^{-1}$) y coincide bastante bien con el valor dado por Sun y Mahr (1995) para un bosque boreal en Canadá. Además con los valores disponibles de r_a^* , podemos comprobar cómo la relación entre ésta y r_a^a se sigue cumpliendo para nuestro caso de forma aproximada.

Por otro lado, también hemos realizado el cálculo teórico de la resistencia aerodinámica a la transferencia de momento, $r_a^a = 12,5 \pm 1,8 \text{ s m}^{-1}$.

Ambos valores (r_a^* y r_a^a) están de acuerdo con los obtenidos por otros autores (ver Tabla 1).

CONCLUSIONES

En este trabajo hemos calculado de forma experimental un valor para la resistencia aerodinámica correspondiente a un bosque boreal, $r_a^* = 32,3 \pm 1,6 \text{ s m}^{-1}$. Para ello, hemos necesitado, en primer lugar,

Autores	Tipo de bosque	z_0 (m)	d (m)	Pv (%)	r_a^a (s/m)	r_a^* (s/m)
Sun y Mahr (1995)	Bosque boreal en Canadá	1,00	8,70	21	13	-
Stewart (1989)	Bosque de pinos en Inglaterra	1,65	11,00	-	7,0	-
Szeicz et al, (1969)	Bosque de pinos en Alemania	2,72	18,13	90	0,60	-
Burke y Stewart (1997)	Bosque abierto en Níger	0,29	2,25	33	32	86
Stewart et al (1994)	Bosque abierto en Níger	0,40	2,00	33	28	60
Ohta et al (2001)	Bosque en Siberia	2,58	6,24	-	6,2	-

Tabla 1. Parámetros característicos y resistencias aerodinámicas obtenidas para diversos tipos de bosque

obtener las temperaturas de cultivo a partir de los valores medidos de radiancia, según el método expuesto por Niclós et al (2003).

Una vez conocido el valor de r_a^* y haciendo uso de las ecuaciones (8) y (9), tenemos un método operativo para el cálculo de la evapotranspiración del bosque boreal a partir de medidas de teledetección.

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestra gratitud a la Agencia Espacial Europea (ESTEC Contrato nº 16026/02/NL/SF), al Ministerio de Ciencia y Tecnología (Proyecto REN2001-3116) y a la Unión Europea (Fondos Feder), por la financiación recibida.

BIBLIOGRAFÍA

- BROWN, J. W. y ROSENBERG, N. 1973. A resistance model to predict evapotranspiration and its applications to a sugar beet field. *Agronomie F* 65, 341-452.
- BURKE, E. J. y STEWART, J. B. 1997. Test of a sensible heat flux-Radiometric surface temperature relationship for HAPEX - SAHEL. *Boundary - Layer Meteorology* 84 (2): 329-337
- CASELLES, V., SOBRINO, J. A. y COLL, C. 1992. On the use of satellite thermal data for determining evapotranspiration in partially vegetated areas. *International Journal of Remote Sensing*. 13(14): 2669-2682.
- ITIER, B. y RIOU, C. 1982. Une nouvelle méthode de détermination de l'évapotranspiration réelle par thermographie infrarouge. *Journal de Recherches Atmospheriques*. 16: 113-125.
- NICLÓS, R., CASELLES, V., VALOR, E. y COLL, C. 2003. Air-Canopy Temperature Difference for Fluorescence Emission Models. *Proceedings of the IGARSS 2003*, Toulouse, julio 2003.
- NORMAN, J., KUSTAS, W. y HUMES, K. 1995. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*. 77: 263-293.
- OHTA, T., HIYAMA, T., TANAKA, H., KUWADA, T., MAXIMOV, T.C., OHATA, T. y FUKUSHIMA, Y. 2001. Seasonal variation in the energy and water exchanges above and below a larch forest in eastern Siberia. *Hydrological Processes*. 15: 1459-1476.
- PENMAN, H.L. y LONG, I.F. 1960 Weather in wheat - an essay in micro-meteorology, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 86: 16-50.
- SAVAGE, M. J., McINNES, K. J. y HEILMAN, J.L. 1996. The "footprints" of eddy correlation sensible heat flux density, and other micrometeorological measurements. *South African Journal of Science*. 92: 137-142.
- SEGUIN, B. e ITIER, B. 1983. Using midday surface temperature to estimate daily evaporation from satellite thermal IR data. *International Journal of Remote Sensing*. 4(2): 371-383.
- STEWART, J. B. 1989. On the use of the Penman-Monteith equation for determining areal evapotranspiration. *International Association of Hydrological Science*. 177: 3-12.
- STEWART, J. B., KUSTAS, W. P., HUMES, K. S., NICHOLS, W. D., MORAN, M. S. y DE BRUIN, H. A. R. 1994. Sensible heat flux-Radiometric surface temperature relationship for eight semiarid areas. *Journal of Applied Meteorology*. 33: 1110-1117.
- SUN, J. L. y MAHRT, L. 1995. Relationship of surface heat flux to microscale temperature variations: application to BOREAS. *Boundary-Layer Meteorology*. 76(3): 291-301.
- SZEICZ, G., ENDRODI, G. y TAJCHMAN, S. 1969. Aerodynamic and surface factors in evaporation. *Water Resources Research*. 5: 380-394.

NOTICIAS

La revista de Teledetección insertará figuras EN COLOR, acompañando los textos de los artículos seleccionados.

Mediante esta decisión, se vuelve a recuperar uno de los objetivos iniciales de la revista. Parecía una necesidad obvia incluir los resultados gráficos en color para alcanzar mayor calidad de este instrumento de comunicación entre los miembros de la comunidad científica española que trabaja en Teledetección.

Por tanto, desde estas páginas se anima de nuevo a todos aquellos profesionales involucrados en estudios científicos o técnicos de Teledetección a que envíen sus trabajos a la revista, considerando esta nueva posibilidad.

Seguimos trabajando en la mejora de calidad de la revista. Serán bienvenidas todas aquellas sugerencias que permitan alcanzar ese objetivo.