

LA MEDIDA TERMICA DEL FLUJO DE SAVIA APLICADA AL ESTUDIO DE LA EXTRACCION DE AGUA POR LOS ARBOLES: REVISION BIBLIOGRAFICA Y PUESTA A PUNTO DEL METODO

M. A. GONZALEZ GARCIA¹
A. PAZ GONZALEZ²
A. CASTELAO GEGUNDE¹

¹ Escuela Politécnica Superior de Lugo. Universidad de Santiago de Compostela

² Facultad de Ciencias. Universidad de La Coruña. ESPAÑA

RESUMEN

En este trabajo se revisan los principales métodos actualmente disponibles para la estimación del flujo de savia. Se describe la puesta a punto de un dispositivo de medida de bajo coste, que consiste en dos sensores térmicos (termopares de cobre-constantan), uno de los cuales se conecta a una fuente de calor de potencia constante. Los sensores se insertan en el xilema para medir los cambios de temperatura de la savia. Para la ulterior estimación mediante este método de la intensidad del flujo de savia, expresada volumétricamente, no es necesario un calibrado, ya que en la bibliografía se dispone de coeficientes empíricos de precisión contrastada.

El dispositivo puesto a punto se ensayó en condiciones de campo para estimar la intensidad de la transpiración de un abedul tanto a escala horaria como diaria. Los resultados obtenidos indican que, para intensidades de flujo altas y medias, el sensor térmico estima satisfactoriamente la transpiración de árboles individuales.

PALABRAS CLAVE: Transpiración
Flujo de savia
Métodos térmicos
Termopares
Abedul

INTRODUCCION

La vegetación ejerce un doble efecto sobre el balance hídrico. En primer lugar intercepta una parte de la lluvia que podría haber caído en la superficie del suelo; por otra parte, debido al proceso de la transpiración, extrae el agua almacenada en los horizontes del suelo y la transporta hacia la atmósfera.

La evaluación de los diferentes términos del balance hídrico, incluso a escala de una parcela homogénea, es compleja. A pesar de la atención que se ha

Recibido: 24-7-95

Aceptado para su publicación: 29-1-96

prestado al desarrollo de instrumentos de medida y a su adaptación a diferentes condiciones de cultivo y vegetación natural, la puesta en práctica de métodos tradicionalmente usados para evaluar el consumo de agua por las especies arbustivas y arbóreas, como son la medida del balance hídrico y las técnicas micrometeorológicas, están sujetos a revisión continua.

En el caso más sencillo, la estimación del consumo de agua según el método del balance hídrico se efectúa a partir de medidas de precipitación, drenaje y variación de la reserva del agua disponible para la vegetación (Villagra *et al.*, 1994); con frecuencia es necesario considerar también la escorrentía.

Si la escorrentía es nula, la mayor dificultad para efectuar el balance hídrico en una parcela forestal o un cultivo arbóreo está en la medida del agua almacenada en el suelo, Δw . Esto es debido a la gran profundidad que alcanza el sistema radicular de las especies arbóreas y, en su caso arbustivas, que no solo explora los horizontes superficiales y profundos del suelo, sino que, con frecuencia, penetra en la capa de alteración, a favor de grietas. La gran extensión del sistema radicular y las discontinuidades de los horizontes profundos dificultan la medida de perfiles hídricos por técnicas convencionales como la humedadría de neutrones o la reflectometría en el tiempo (TDR), por lo que no es posible la evaluación del agua de reserva del suelo disponible para la planta en todo el volumen explorado por las raíces.

Otra limitación que presenta el método del balance hídrico es la representatividad de las medidas efectuadas en perfiles individuales; debido al gran número de medidas que se requieren, son muy escasos los estudios que analizan la variabilidad espacial de las propiedades hidráulicas del suelo y del balance hídrico (Greminger *et al.*, 1985; Reichardt *et al.*, 1993; Villagra *et al.*, 1994).

Los métodos micrometeorológicos, basados en la medida del balance energético y los flujos de agua y calor en el límite superior y/o el interior de las masas vegetales, son una alternativa que se ha usado con frecuencia (McNaughton, Black, 1973; Shuttleworth, 1989, etc.) para evaluar las pérdidas de agua de la cubierta vegetal. Estos métodos proporcionan una buena estimación global de la evapotranspiración real (ETR); sin embargo, solo permiten un análisis simplificado de la dinámica del agua y no proporcionan información sobre la importancia relativa de los distintos términos de que ésta consta, a saber: la transpiración de la masa arbórea, E_t , la interceptación, E_i y la evaporación directa desde el suelo, E_s .

Por otro lado, para profundizar en el estudio del consumo hídrico de parcelas forestales y agrícolas con arbolado, es necesario registrar series de datos que permitan evaluar la transpiración de las especies arbóreas, con independencia de la de los estratos arbustivos y/o herbáceos. El método del balance hídrico, por sí solo, no permite este refinamiento. La medida simultánea de la evolución de la reserva hídrica del suelo y del flujo de calor sensible a más de un nivel han permitido, en determinadas condiciones, estimar por separado la transpiración del estrato arbóreo y el sotobosque Diawara *et al.*, 1991; Berbigier *et al.*, 1991). Este tipo de experiencias, no obstante, requieren un número considerable de instrumentos tanto en los límites superior e inferior como en el interior del sistema suelo-planta-atmósfera.

Por último, en determinados paisajes, como ocurre por ejemplo en las regiones atlánticas europeas, y debido a la acción del hombre, se reconoce un

mosaico de pequeñas parcelas forestales y agrícolas con distintas características aerodinámicas, lo que origina un incremento de la variabilidad espacial y supone una limitación para la aplicación de los métodos tradicionales de estudio de las transferencias de agua. Esta limitación también se reconoce cuando se estudia el balance hídrico de árboles aislados en áreas rurales o urbanas.

La medida de la velocidad o del flujo de savia en el tronco o las raíces puede proporcionar una buena estimación directa de la transpiración. En las últimas décadas se han desarrollado paralelamente diversas teorías y técnicas de medida; parece que en el estado actual de conocimientos no puede generalizarse la aplicación de ninguna de ellas a todos los tamaños de árboles ni a las diversas especies. La medida del flujo de savia mediante un sensor térmico implantado en el xilema se ha utilizado con frecuencia en especies arbóreas (Granier, 1985, 1987; Granier *et al.*, 1990; Diawara *et al.*, 1991; Cabibel, Do., 1991a); también ha sido usado en arbustos (Brenner *et al.*, 1991) y adaptado a especies herbáceas (Baker, Van Bavel, 1987). Combinado con otras medidas puede utilizarse asimismo para estimar por separado el consumo hídrico por transpiración y debido a los restantes conceptos: la evaporación directa del suelo, E_s e interceptación, E_i .

Dado que se trata de un método fisiológico, la medida del flujo de savia presenta la ventaja adicional de integrar a la vez las consecuencias derivadas de la acción del contenido hídrico del suelo y de la demanda climática de agua sobre el funcionamiento hídrico del vegetal. En consecuencia, permite analizar no solo el consumo hídrico real de la planta, sino además detectar la presencia de un estrés hídrico y evaluar las necesidades de riego (Cabibel, Do., 1991a).

El objetivo de este trabajo es, en primer lugar, efectuar la puesta a punto de un sensor térmico para la medida del flujo de savia, discutiendo el fundamento, modo de construcción y utilización para la evaluación del flujo de agua. En segundo lugar, se presentan ejemplos de los primeros resultados obtenidos y se analiza la validez del método.

CONSIDERACIONES TEÓRICAS

Medida por vía térmica del flujo de savia

La estimación por vía térmica del flujo de savia bruta ha sido ya objeto de estudio desde hace tiempo, citándose entre los autores pioneros a Huber, Schmidt (1937) y Marshall (1958). Más recientemente, la utilización de métodos térmicos recibió un nuevo impulso a partir de trabajos metodológicos como los de Cohen *et al.*, (1981); Swanson (1962, 1972), Granier (1985) y Valancogne, Nasr (1989). La justificación teórica común de las diferentes técnicas tiene su fundamento en la gran capacidad calorífica que presenta el agua; como consecuencia de ello, el movimiento de savia provoca una perturbación significativa de la difusión de calor en los tejidos vegetales. La evaluación de las transferencias hídricas por vía térmica se basa en un análisis detallado de la oscilación de temperatura en el conjunto leño-savia bajo el efecto de un flujo convectivo. Generalmente, la fuente de calor es externa, y la temperatura se mide a una dis-

tancia dada de ella; en ocasiones el foco de calor también puede estar implantado en el xilema.

Se distinguen tres tipos principales de métodos térmicos para la medida del flujo de savia:

- Balance térmico en el estado estacionario (BTE)
- Velocidad de desplazamiento de un impulso térmico breve (VIT)
- Conductividad de la savia, a partir de fuente de calor lineal (CST)

Las técnicas incluidas en los dos primeros grupos tienen en común que la fuente de calor es externa al xilema.

El balance térmico en condiciones de estado estacionario se lleva a cabo en un fragmento de tallo, que es calentado en continuo mediante una potencia conocida. Si a través del xilema se desplaza un caudal de agua constante, la temperatura de la savia aumenta inicialmente pero tiende a alcanzar un valor estable; en condiciones ideales, la cantidad de calor transportada por el flujo de agua es igual a la cantidad de calor suministrada. En la práctica existe transporte convectivo de calor; sin embargo, admitiendo que se cumplen las condiciones del estado estacionario, se puede separar por balance la cantidad de calor perdida por convección y por conducción (Sakurtani, 1981; Valancogne, Nasr, 1989; Groot, King, 1992). Conocida la cantidad de calor perdida por la acción del flujo convectivo de agua, se evalúa el flujo de savia. El método del BTE proporciona buenos resultados cuando el flujo de agua es elevado (Swanson, 1994).

La medida de la velocidad de un impulso térmico presenta, asimismo, diversas variantes. La más clásica (Huber, Schmidt, 1932) consiste en determinar el tiempo que tarda en ser registrado el máximo de temperatura a una distancia conocida de la fuente de calor, con posterioridad a la emisión de un impulso. Inicialmente la velocidad del flujo se estimaba dividiendo la distancia entre la fuente de calor y el termopar por el tiempo; en la actualidad, la estimación del flujo de savia está basada en la solución analítica de Marshall de la ecuación que rige la difusión de calor en un medio isótropo acoplado al transporte convectivo de un fluido homogéneo. El principal inconveniente de estos métodos son los errores cometidos en presencia de un gradiente radial de flujo. Algunos autores (Cohen *et al.*, 1982; Swanson, 1972) analizaron las condiciones en que la aplicación del VIT puede producir resultados aceptables.

El tercer método (CST), propuesto por Granier (1985), constituye una novedad con relación a los anteriores, ya que utiliza una fuente de calor lineal (sensor cálido) implantado en el xilema. Consiste, en esencia, en una evaluación del flujo de savia por unidad de superficie y en la unidad de tiempo, en base al registro de la oscilación de temperatura del sensor cálido con respecto a un estándar. Se puede considerar que la magnitud medida es una conductividad, dado que se trata de un caudal por unidad de superficie.

En este trabajo se discute la puesta a punto de la medida por vía térmica de la conductividad de la savia, según Granier, 1985 a partir de una fuente de calor lineal implantada en el xilema. Una ventaja de la medida del flujo por el método CST, que también presentan las técnicas que evalúan el balance térmico (BTE), estriba en que su uso no requiere un calibrado de los sensores individuales o para cada especie estudiada, por lo que estos dos métodos permiten obtener directamente datos cuantitativos.

Medida de la conductividad del xilema según el método de Granier

La medida consiste, en esencia, en el registro de la temperatura mediante un termopar que se inserta radialmente en el xilema, a modo de aguja, y que a su vez se conecta a una fuente de alimentación, que lo calienta con una potencia constante.

La temperatura del sensor es máxima cuando el flujo de savia es nulo y disminuye conforme la velocidad de la savia aumenta, ya que entonces se pierde por convección una cantidad de calor creciente. En la práctica, debido a la variabilidad de las condiciones térmicas ambientales, se mide la diferencia de temperatura entre el termopar conectado a la fuente de alimentación (sonda cálida) y otro termopar de referencia idéntico, que no se calienta y se inserta a 10-15 cm por debajo del anterior (sonda de referencia); con ello se logra reducir al mínimo el efecto de las variaciones de la temperatura ambiente sobre el sistema leño-sensor.

El termopar de referencia se considera, por lo tanto, en equilibrio térmico con el sistema leño-savia; la temperatura de referencia se admite que equivale a la que se registraría, en ausencia de calefacción, en la zona de inserción del sensor cálido. La diferencia de temperaturas entre los termopares, dT , pasa por un máximo, dT_{\max} , cuando el flujo de savia se anula (Granier, 1985).

La velocidad con que se desplaza la savia, por unidad de sección conductora, es decir, la conductividad, es función de la diferencia de temperaturas. La relación entre la conductividad del xilema y la oscilación térmica de la sonda cálida ha sido determinada por calibrado en el laboratorio (Granier, 1985) y ello permite calcular directamente el flujo de savia.

En efecto, la evaluación del flujo de savia a través de un árbol, U , puede obtenerse a partir de la conductividad, u , y la superficie de tejido conductor, S_u :

$$U = u S_u \quad [1]$$

en donde, U = flujo total (ml.h^{-1})

u = conductividad ($\text{ml.h}^{-1}.\text{cm}^{-2}$)

S_u = superficie conductora (cm^2)

La conductividad o densidad de flujo por unidad de área, se deduce a partir de la curva de calibrado que la relaciona con una variable adimensional, obtenida por vía térmica, que se denomina índice de flujo, K , de acuerdo con la siguiente expresión:

$$u = (K/\alpha)^{1/\beta} \quad [2]$$

en donde, α y β son coeficientes de ajuste de la relación u (K).

El índice de flujo, K , se determina directamente midiendo la oscilación de temperatura en la sonda cálida y viene dado por la siguiente expresión:

$$K = \frac{(T_o - T_{bo}) - (T_u - T_b)}{(T_u - T_b)} = \frac{\delta T_o - \delta T_u}{\delta T_u} = \frac{\delta T_o}{\delta T_u} - 1 \quad [3]$$

en donde, T_o = temperatura de la sonda cálida en ausencia de flujo
 T_{bo} = temperatura del medio leño-savia en ausencia de flujo
 T_u = temperatura de la sonda cálida, si la densidad de flujo es u
 T_b = temperatura del medio leño-savia, si la densidad de flujo es u
 δT_o = diferencia de temperatura máxima, en ausencia de flujo
 δT_u = diferencia de temperatura, si la densidad de flujo es u

Para una secuencia de medida de n días, la estimación del término δT_o se lleva a cabo tomando la envolvente superior de los máximos nocturnos durante el período estudiado.

Los cálculos se ven simplificados, dado que la diferencia de temperaturas entre las sondas cálida y de referencia se puede expresar como una diferencia de potencial, en milivoltios.

Dispositivo de medida del flujo de savia

Al igual que la mayor parte de las técnicas de medida del flujo de savia por vía térmica, el método de Granier utilizado en este trabajo es no destructivo. Los tempopares han de insertarse radialmente, bien en el tejido conductor del tronco o bien en el de las raíces. Los principales factores de los que depende la precisión de los resultados son:

- calidad del contacto entre las sondas y el xilema
- protección térmica de las sondas
- ausencia de interferencias entre las sondas cálida y de referencia
- posibilidad de automatizar el registro de medidas

Para asegurar un buen contacto con el tejido conductor se perfora previamente un orificio de 2 cm de longitud y 2 mm de diámetro, medidas similares a las del sensor empleado. Es conveniente llevar a cabo la inserción del sensor efectuando una pequeña presión. Finalmente se aplica externamente sobre el sistema leño-sensor un mucflago de fijación que contribuye al mismo tiempo a la estabilidad del conjunto.

La protección térmica de la sonda cálida y de la de referencia tiene como objetivo minimizar el efecto de las variaciones bruscas de temperatura del aire sobre los gradientes térmicos registrados en las zonas de inserción (Granier, 1985; Cabibel, Do, 1991). No obstante, cuando se efectúan medidas en las raíces es conveniente tener en cuenta el efecto del gradiente térmico diferencial entre los dos sensores sobre la conductividad de la savia, mediante el cálculo un coeficiente corrector (Cabibel, Do, 1991a).

Para evitar las interferencias térmicas entre las dos sondas se sitúa la de referencia a 8-10 cm por debajo de la cálida y sobre una generatriz algo desplazada lateralmente; de este modo se impide que el dispositivo de medidas afecte a los vasos que conducen la savia hacia el sensor situado en la parte superior.

Una vez puesto a punto el dispositivo de medida su utilización, así como el posterior análisis de los datos, se ve facilitada por la automatización; para ello conviene disponer de un sistema de adquisición de datos con una resolución del orden de los μV .

Finalmente, para obtener medidas representativas de la transpiración a escala de una parcela es necesario efectuar medidas en árboles que sean repre-

sentativos de las condiciones medias de crecimiento, ya que la variabilidad entre árboles individuales de la misma edad y porte similar puede ser importante. De acuerdo con Cabibel y Do (1991) y Diawara *et al.*, (1991), si se llevan a cabo cuatro a cinco repeticiones en plantaciones uniformes, los coeficientes de variación del flujo de savia son inferiores al 10 p. 100.

MATERIAL Y METODOS

Construcción del sensor térmico

Los sensores térmicos utilizados se construyeron en el Servicio Técnico de la Universidad de Santiago de Compostela, de acuerdo con el procedimiento que describe Granier (1985). Cada sensor consta de dos termopares de cobre-constantan, dispuestos en el interior de tubos de aluminio cilíndricos, de 2 mm de diámetro y 2 cm de longitud. Los termopares se construyen con hilos de cobre y constantan muy finos (diámetro < 0,1 mm), se aíslan mediante una resina y se instalan en una aguja hipodérmica, que sirve de soporte. Sobre la aguja se enrolla un hilo de constantan de 0,15 mm de diámetro, a lo largo de un segmento de 20 mm, de modo que las sucesivas espiras estén unidas entre sí. En la sonda cálida este elemento actúa como una resistencia, disipando una potencia eléctrica constante, cuando es recorrida por una corriente eléctrica, que se transforma íntegramente en calor. Finalmente, la aguja, con el termopar y el constantan enrollado, se introduce en el pequeño tubo de aluminio.

La potencia (P) de la corriente que pasa a través del sensor ha sido estandarizada en 0,177 W. Se construyeron sensores cuya resistencia (R) era de 30 Ω . La ley de Joule establece que:

$$P = Ri^2, \text{ de donde } i^2 = P/R \quad [4]$$

De aquí se deduce que la intensidad de la corriente que pasa a través de la sonda cálida ha de ser regulada a 0,075 A.

Estimación del flujo y expresión de los resultados

Para diversas especies forestales de hoja caediza los valores experimentales de los parámetros α y β que figuran en la ecuación [2] han sido determinados por Granier (1985) y Cabibel y Do (1991a). La relación entre conductividad, K, y densidad de flujo, u, propuesta por estos autores ha sido la utilizada en este trabajo, y viene dada por la expresión siguiente:

$$(\delta T_o - \delta T_u) / \delta T_u = K = 227,2 \cdot 10^4 \cdot u^{0,7694} \quad [5]$$

Donde u, la densidad de flujo de savia por unidad de sección conductora, viene expresada en $\text{cm}^3/\text{cm}^2/\text{s}$ (equivale, por lo tanto, a una conductividad expresada en cm/s).

Teniendo en cuenta las expresiones [1] y [5], la transpiración total a través de un árbol individual, finalmente, se calcula con la fórmula:

$$U = 15,85 \cdot 10^{-4} \cdot K^{1,30} \cdot S_u \quad [6]$$

Donde U es la transpiración (en cm^3/h o ml/h), K la conductividad o índice de flujo, en $\text{ml}/\text{cm}^2/\text{h}$, y S_u la sección del xilema al nivel en el que se efectúa la medida (cm^2).

En realidad, a efectos prácticos, el transporte de savia puede expresarse en las siguientes unidades:

- Cuando se refiere a densidad de flujo, los datos obtenidos mediante la ecuación [5] se expresan en $\text{ml}/\text{h}/\text{cm}^2$.
- Cuando se analiza la cinética de la transpiración hora a hora, se usa la ecuación [6], con lo que los resultados se obtienen en ml/h .
- Cuando se analiza la transpiración diaria, a efectos prácticos, ésta se hace corresponder con el flujo acumulativo a lo largo del día. A partir del volumen de agua perdido por cada árbol ($\text{l}/\text{día}$) y conociendo la densidad de la plantación se puede estimar también la transpiración por unidad de superficie ($\text{l}/\text{día}/\text{m}^2$), asumiendo que la extracción de agua es homogénea en toda la parcela experimental.

Características de la parcela estudiada y dispositivo de medida

Los sensores para medida del flujo de savia se ensayaron en una parcela de abedul (*Betula pendula*, Rothm) situada en las proximidades de Ludrio (Lugo). La edad de la plantación era de 12 años y la densidad de 1.100 plantas/ha.

En uno de los árboles, elegido de modo que se consideró que representaba las condiciones medias de la parcela, se registró durante 100 h el índice de flujo y a partir de los datos obtenidos se evaluó la transpiración.

La experiencia se llevó a cabo en el mes de Septiembre de 1994, en las fechas previas al equinoccio de otoño, siendo por lo tanto la duración del día próxima a las 12 horas. Las hojas de la especie estudiada comenzaban a presentar los primeros síntomas de senescencia, por lo que se asume que en esta época del año, hacia finales del ciclo vegetativo, la intensidad de la transpiración era inferior a la máxima correspondiente a estadios vegetativos anteriores.

La humedad del suelo estaba próxima a capacidad de campo, por lo que se considera que no limitaba el abastecimiento hídrico de la planta.

En la Figura 1 se presenta un esquema del dispositivo experimental empleado. La sonda de referencia se instaló en el tronco a 60 cm de altura y el sensor cálido se situó aproximadamente 10 cm por encima del anterior. El diámetro medio del leño en la zona de inserción de las sondas era de 4,5 cm y este dato se usó para estimar la sección conductora de savia.

La protección térmica consistió en el recubrimiento de las sondas con papel de aluminio. Con objeto de comprobar la presencia eventual de gradientes térmicos o de variaciones bruscas de la temperatura exterior se instalaron dos termopares a 60 y 100 cm.

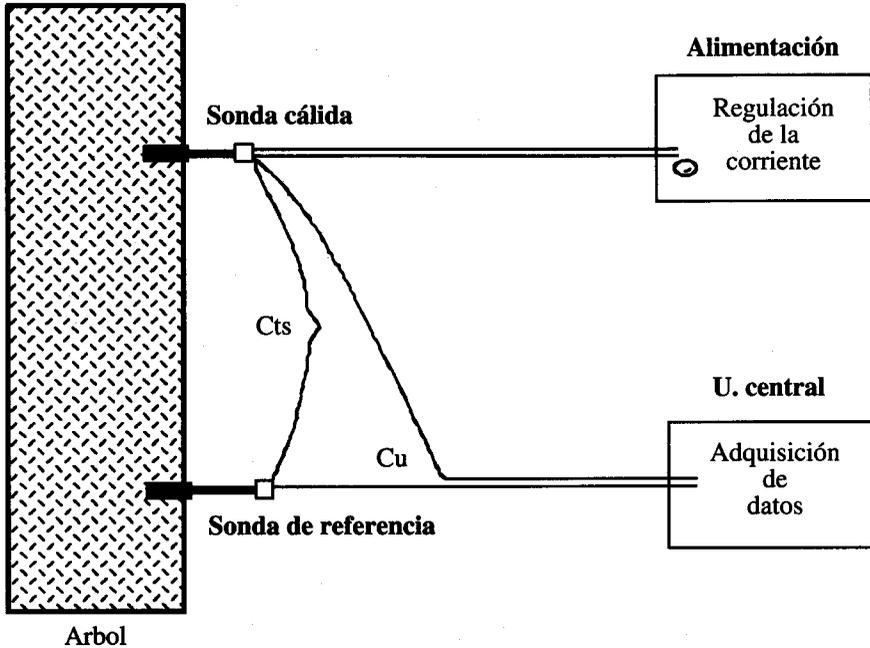


Fig. 1.—Esquema del dispositivo experimental utilizado
Representation of the experimental design

Las medidas se efectuaron en continuo. La corriente eléctrica que procede del sensor se registró mediante una adquisición de datos (Campbell 21 X), siendo el intervalo de medida de 15 min. La temperatura del aire también fue escrutada con una periodicidad similar mediante los termopares situados a 60 y 100 cm.

Para caracterizar las condiciones climáticas en la zona de estudio se utilizaron, asimismo, los datos medidos en el observatorio de Rozas (Lugo), una estación de primer orden del INM, situada a 3 km en línea recta de la parcela experimental, así como los de una estación automática situada en el Campus de Lugo, aproximadamente a 20 km de la misma.

RESULTADOS Y DISCUSION

Dado que los termopares situados a 60 y 100 cm proporcionaron medias de temperatura diaria del aire similares que diferían en menos de 0,4°C, se considera que el efecto del gradiente de temperatura sobre las sondas térmicas implantadas en el xilema es nulo, por lo que la conductividad y la transpiración total se calcularon mediante las expresiones [5] y [6] respectivamente.

En la Figura 2 se puede apreciar la evolución del flujo de savia registrado en continuo durante 100 h seguidas; los resultados se expresan en función de la conductividad, siendo las unidades en $\text{ml}/\text{cm}^2/\text{h}$. En primer lugar, se aprecia que durante la noche, cuando las diferencias de temperatura de las sondas cálida y de referencia son máximas, el flujo de savia se estabiliza alcanzando, como cabe esperar, valores nulos. En las primeras horas de la mañana se registra una fase de rápido crecimiento del flujo, de modo que en un intervalo relativamente breve de tiempo, de una a dos horas, pueden alcanzarse intensidades próximas a las máximas. Entre las 12 horas y las 4 de la tarde (horario de verano, aproximadamente las 10 y las 2, hora solar) se registra una fase de intensidades máximas de flujo de savia, que en los días nublados puede ser interrumpido y oscilar en función de la presencia o ausencia de claros. Posteriormente puede apreciarse una fase de disminución de las transferencias de agua a través del árbol, más lenta y progresiva que la fase matinal de incremento de flujo.

En la misma figura también se representa la oscilación de dos índices de demanda climática de agua, como son la irradiación solar global y la evapotranspiración de referencia (ET_0), calculada esta última de acuerdo con el método de Penman-Monteith para una cubierta de pratenses. Se puede apreciar, en primer lugar, que hay una notable sincronía entre la cinética del flujo y la demanda climática; el paralelismo es más acusado cuando el flujo de savia se compara con la ET_0 que con la irradiación global y, en términos generales, a un aumento o disminución de la evapotranspiración le corresponde un aumento o disminución de la intensidad del flujo de savia. En realidad, el paralelismo entre conductividad a través del xilema y demanda climática sería más acusado de lo que sugieren los datos presentados en la Figura 2, ya que el flujo de savia era escrutado mediante el sensor térmico cada 15 minutos y las variables climáticas se registraban en continuo, siendo integrados los datos y referidos a períodos de 30 minutos. Las diferencias en cuanto a la forma más o menos suavizada de las curvas que representan la cinética del flujo de agua y la demanda climática se pueden atribuir en parte a la distinta escala temporal.

Sin embargo, es necesario destacar, asimismo, no sólo el hecho ya señalado de que la intensidad de flujo de agua varíe más rápidamente durante la fase de crecimiento matinal que durante la de disminución vespertina, sino también que en ausencia de irradiación solar no siempre se anula el flujo de savia a través del xilema, de modo que se ha apreciado conductividad durante algunas horas de la noche, si bien con una intensidad débil; este transporte nocturno de agua, siempre de pequeña magnitud ha sido registrado por otros autores (Green, Clothier, 1988; Cabibel, Do, 1991b). Admitiendo la hipótesis de la ausencia de un transporte de savia conservativo en el sistema suelo-planta-atmósfera, estos fenómenos pueden estar originados por la reconstitución de las reservas hídricas de la parte aérea del árbol; del mismo modo la fase matinal de rápido incremento de flujo podría explicarse admitiendo que a la salida del sol parte de la reserva hídrica de los órganos aéreos se utiliza para satisfacer la demanda climática.

Si bien son poco frecuentes en la bibliografía los datos sobre la precisión de las medidas de flujo de savia, cabe citar el análisis que sobre los errores del método de Granier llevaron a cabo Cabibel y Do (1991a); según estos autores, pueden distinguirse tres niveles de sensibilidad diferente:

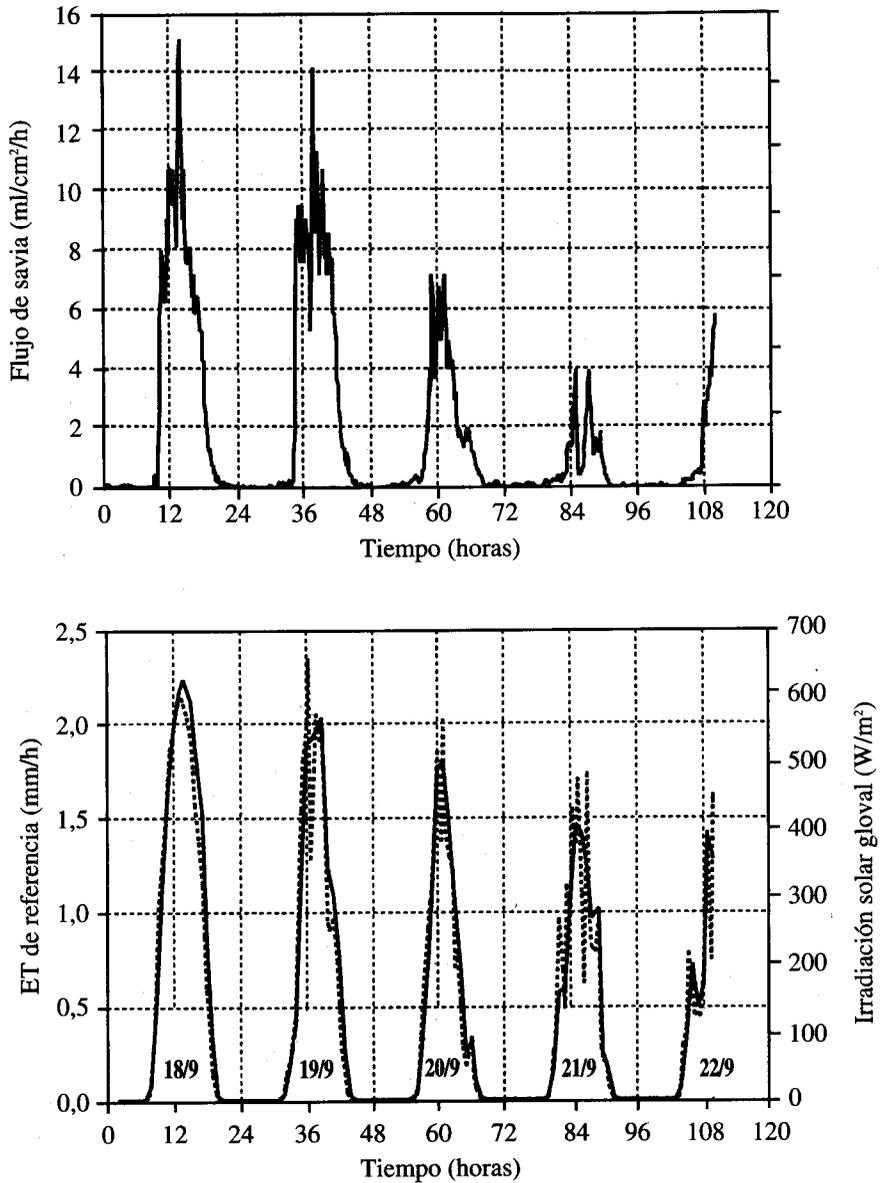


Fig. 2.—Evolución diaria de la conductividad instantánea a lo largo de la secuencia estudiada (Superior)

Evolución diaria de la Irradiación solar (—) y la Evapotranspiración de referencia (- - -) (Inferior)

Daily pattern of instantaneous conductivity over the studied time sequence (Up)

Daily pattern of solar irradiation (—) and reference evapotranspiration (- - -) (Down)

- Una zona con niveles de precisión débil (50 a 60 p. 100), que corresponde a flujos poco intensos ($<2,5 \text{ ml.h}^{-1}.\text{cm}^{-2}$), similares a los estimados al comienzo y final del día o durante la noche.
- Una zona con niveles de precisión intermedia (20 a 25 p. 100) que corresponde a intensidades de flujo comprendidas entre $2,51$ y $10 \text{ ml.h}^{-1}.\text{cm}^{-2}$.
- Una zona con niveles de precisión altos (10 a 12 p. 100), que ocurre cuando los flujos presentan una intensidad mayor que $10 \text{ ml.h}^{-1}.\text{cm}^{-2}$.

De acuerdo con estos resultados, la incertidumbre en la estimación del flujo instantáneo es función de su intensidad. Por lo tanto, a escala horaria, la precisión de los datos de conductividad representados en la Figura 2 únicamente fue alta al mediodía de los días 18 y 19 de Septiembre y durante el resto de la secuencia las medidas son menos precisas. Dado lo avanzado del ciclo vegetativo en la época en que se ensayó el sensor, cabe esperar una precisión mayor de las medidas de flujo de savia durante aquellos estadios fenológicos, en los que la demanda climática de agua, y, por lo tanto, el transporte a través del xilema, hayan sido más elevados.

A pesar de la importante incertidumbre relativa de la estimación del flujo instantáneo, y dado que los flujos débiles o muy débiles ocurren en determinadas fases transitorias a lo largo del ciclo diario, la precisión de la estimación global para un período de 24 horas puede considerarse alta, de modo que los errores acumulativos serían inferiores al 10 p. 100.

En la Figura 3 se representa, a escala diaria, la extracción de agua acumulativa por las partes aéreas del árbol empleado para ensayar el sensor, durante los días que duró la experiencia. Se observa que el volumen de agua transpirada es relativamente constante durante los días 18 y 19 de septiembre, alcanzando cifras superiores a los 6 litros diarios; el día 20 se reduce a la mitad siendo estimado su valor en una cifra próxima a 3 litros y el día 21 sólo llega a una cifra del orden de 1,2 litros. En la Figura 2 se aprecia que entre los días 19 y 21 la demanda atmosférica de agua también fue disminuyendo progresivamente, si bien la reducción del flujo de savia era más importante, por lo que la eficacia de la transpiración, dada por la relación entre la evapotranspiración real y la potencial o de referencia (ET_r/ET_p), no se mantiene constante durante la secuencia estudiada.

Asumiendo que a escala diaria el flujo de savia es conservativo se pudo evaluar esta eficacia, por el procedimiento descrito a continuación. Si se tiene en cuenta la densidad de la plantación, es decir, asignándole a cada árbol una superficie de $9,01 \text{ m}^2$, y asumiendo que la transpiración en ésta era uniforme, se pueden estimar las pérdidas de agua expresadas en $\text{l/m}^2/\text{día}$. Los datos de transpiración real (ET_r) así obtenidos se presentan en la Tabla 1, en la que además se consigna la evapotranspiración de referencia (ET_o) correspondiente y la relación ET_r/ET_o . La demanda potencial de agua osciló entre 1,28 y 0,73 mm/día y la ET_r entre 0,71 y 0,14 mm/día. Se comprueba que la eficacia de la transpiración no se mantiene constante durante la secuencia de medidas, siendo mucho más débil el día 21 de Septiembre que los tres días anteriores.

Los valores de la relación ET_r/ET_o durante los días 18 a 20 están más próximos entre sí que el estimado el día 21. Las diferencias observadas no parecen estar justificadas por los datos medios de las variables climáticas registradas

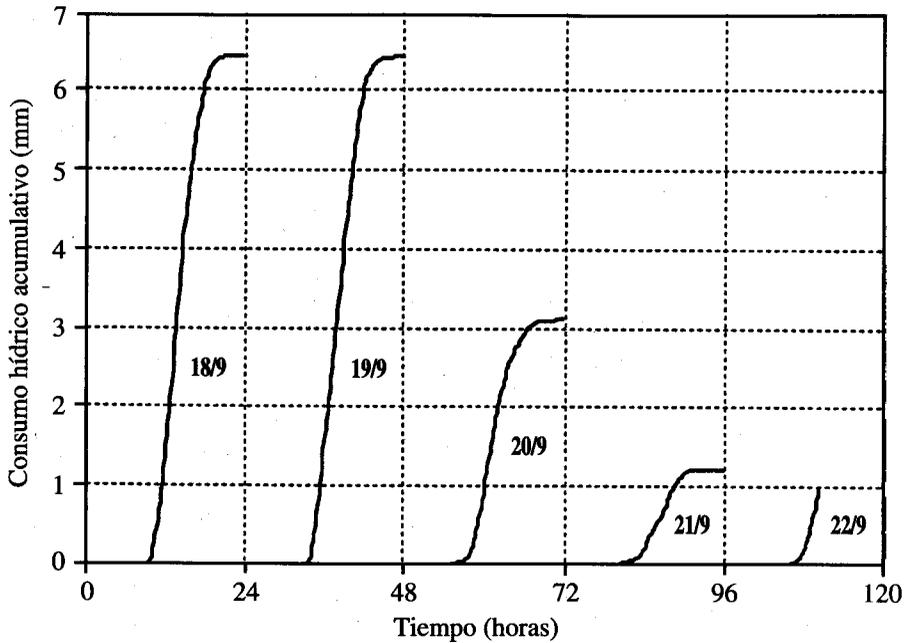


Fig. 3.—Flujo de savia acumulativo a lo largo de los sucesivos días
Daily cumulative sap flow during the studied period

(ET_o , irradiación, temperatura, velocidad del viento), que presentaron oscilaciones de un orden de magnitud inferior, ni tampoco por la variación de la reserva hídrica del suelo, que promediada sobre una profundidad de 1 m, se mantuvo prácticamente constante dada la intensidad relativamente baja de extracción por el árbol.

TABLA 1

EVAPOTRANSPIRACION REAL MEDIA (ET_r) ESTIMAD A EN LA PARCELA ESTUDIADA, EVAPOTRANSPIRACION DE REFERENCIA (ET_o) Y RELACION ET_r/ET_o

Mean actual evapotranspiration (ET_r) as estimated in the studied plot, reference evapotranspiration (ET_o) and ratio ET_r/ET_o

ET_o (mm/día)	1,28	1,03	0,77	0,73
ET_r (mm/día)	0,71	0,71	0,34	0,14
ET_r/ET_o (%)	55,2	68,5	44,5	18,5

Cabibel y Do (1991b) observaron que la relación ET_t/ET_0 de una plantación de frutales era más elevada en días nublados que en días soleados, lo que atribuyeron a que una disminución instantánea de la demanda climática permitiría restaurar parte de la reserva hídrica en el sistema radicular. De acuerdo con ello, cabría esperar una relación ET_t/ET_0 más elevada el día 21, ya que el porcentaje de insolación fue más bajo que en días anteriores. La discrepancia entre estos datos y la relación ET_t/ET_0 medida en el presente trabajo podría explicarse admitiendo la presencia de mecanismos de regulación fisiológicos que dependan no solo de las variables climáticas sino también de la fenología de la especie estudiada. Anteriormente, se ha señalado que la experiencia se llevó a cabo cuando ya se observaban los primeros síntomas de senescencia y, en consecuencia, el transporte de savia era relativamente poco intenso. En estas condiciones pequeñas diferencias en el régimen de oscilación de determinadas variables climáticas, como la temperatura o el viento, entre días sucesivos, unidas a la presencia de procesos de regulación de la transpiración diferentes del control estomático, como son los relacionados con la senescencia y la abscisión foliar, podrían provocar una reducción de la conductividad a través del xilema en el espacio de pocas horas.

Queda por comprobar, finalmente, la contribución efectiva de este método en relación con las siguientes aplicaciones:

- comparar el comportamiento hídrico relativo de diferentes especies y su evolución tanto a escala horaria como diaria,
- caracterizar el estado hídrico de especies arbóreas y arbustivas, y determinar la aparición eventual de un estrés hídrico,
- analizar el comportamiento hídrico de una especie en distintos períodos fenológicos a lo largo del año,
- caracterizar la variabilidad espacial del flujo en una parcela heterogénea como consecuencia de las discontinuidades de la plantación y analizar la precisión de los datos medios obtenidos.

CONCLUSIONES

La puesta a punto de un sensor térmico, que se ensayó en un abedul (*B. pendula*), permitió la cuantificación de la cinética del flujo de savia y la evaluación de la dinámica de la extracción de agua tanto a escala horaria como diaria.

La relación entre los valores de transpiración estimados a partir de los datos obtenidos por vía térmica y la evapotranspiración de referencia no se mantuvo constante durante sucesivos días de medida, poniendo de manifiesto la importancia de los mecanismos fisiológicos de regulación de la transpiración.

El método térmico empleado proporciona datos cuantitativos de flujo de savia de interés en diversas disciplinas, como la hidrología, la física de suelos o la fisiología. Permite caracterizar, a la vez, el comportamiento hídrico de la vegetación arbórea en función de la demanda climática y la disponibilidad hídrica en el suelo. Las principales dificultades para su utilización pueden estar relacionadas con la eficacia del contacto sensor-leño, la medida del área que ocupa el xilema o las interferencias térmicas exteriores.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se llevó a cabo en el marco del proyecto de investigación XUGA 29101B93 financiado por la Xunta de Galicia. Los sensores térmicos utilizados se pusieron a punto con la colaboración del técnico del INRA de Avignon (Francia) Mr. Jean Royère, durante su estancia en la Universidad de Santiago de Compostela.

SUMMARY

Thermal measurement of sap flow applied to the study of the water withdrawal from trees: literature review and method improvement

In this work various thermal methods now available for estimating xylem sap flow are reviewed. A cheap measuring device involving two thermal sensors (copper-constantan thermocouples), one of which is connected to a constantan heat source, was performed. Sensors are inserted into the xylem to measure temperature changes into the sap. Subsequent estimation of the volumetric sap flow rate by this method requires no calibration since empirical coefficients are available from the literature.

The improved device was tested for estimating the hourly and daily transpiration rate of a birch tree in a field situation. Results show that the thermal sensor provides satisfactory transpiration estimates for individual trees under high and medium flow rate conditions.

KEY WORDS: Transpiration
Sap flow
Thermal methods
Thermocouples
Birch tree

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- BAKER J. M., VAN BAVEL C. H. M., 1987. Measurement of mass flow of water in the stems of herbaceous plants. *Plant, Cell Environ.*, 10, 777-782.
- BERBIGIER P., DIAWARA A., LOUSTEAU D., 1991. Etude microclimatique de l'effet de la sécheresse sur l'évaporation d'une plantation de pins maritimes et du sous-bois. *Ann. Sci. For.*, 22, 157-177.
- BRENNER A. J., VAN DEN BELDT R. J., JARVIS P. J., 1991. Transpiration from a neem wind-break in the sahel. In: «Soil water balance in the Sudano-Sahelian Zone», 375-385. IAHS Publ n.º 199.
- CABIBEL B., DO F., 1991. Mesures thermiques des flux de sève dans les troncs et les racines et fonctionnement hydrique des arbres. I. Analyse théorique des erreurs sur la mesure des flux et validation des mesures en présence de gradients thermiques extérieurs. *Agronomie*, 11, 669-678.
- CABIBEL B., DO F., 1991. Mesures thermiques des flux de sève et comportement hydrique des arbres. II. Evolution dans le temps des flux de sève et comportement hydrique des arbres en présence ou non d'une irrigation localisée. *Agronomie*, 11, 757-766.
- COHEN Y., FUCHS M., GREEN G. C., 1981. Improvement of the heat pulse method for determining sap flow in trees. *Plant, Cell and Environment*, 4, 391-397.
- DIAWARA A., LOUSTEAU D., BERBIGIER P., 1991. Comparison of two methods for estimating the evaporation of a *Pinus Pinaster* (Ait) stand: sap flow for energy balance with sensible heat flux measurements by an eddy covariance method. *Agric. For. Meteorol.*, 54, 49-66.
- GRANIER E., 1985. Une nouvelle méthode pour la mesure des flux dans le tronc des arbres. *Ann. Sci. For.*, 45, 193-200.
- GRANIER A., 1987. Mesure du flux de sève dans le tronc du Douglas par une nouvelle méthode thermique. *Ann. Sci. For.*, 44, 1-14.
- GRANIER A., BOBAY V., GASH J. H. C., GELPE J., SAUGIER B., SHUTTLEWORTH W. J., 1990. Vapour flux density and transpiration rate comparisons in a stand of maritime pine (*Pinus pinaster*, Ait) in Les Landes forest. *Agric. For. Meteorol.*, 51, 309-319.

- GREEN S. R., CLOTHIER E., 1988. Water use of kiwifruit vines and apple trees by the heat pulse technique. *Journal of Experimental Botany*, 32: 221-239.
- GREMINGER P. J., SUD Y. K., NIELSEN D. R., 1985. Spatial variability of fields measured soil water characteristics. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49, 1075-1081.
- GROOT A., KING K. M., 1992. Measurement of sap flow by the heat balance method: numerical analysis and application to coniferous seedlings. *Agric. For. Meteorol.*, 59, 289-308.
- HUBER B., SCHMIDT E., 1937. Eine Compensationsmethode zur thermoelektrischen messung langsamer saftströme. *Ber. deutsch. Bot. Ges.*, 55, 514-529.
- McNAUGHTON K. G., BLACK T. A., 1973. Evaporation from a forest: a micrometeorological study. *Water Resour. Res.*, 9, 1579-1590.
- MARSHALL D. C., 1958. Measurement of sap flow in conifers by heat pulse transport. *Plant Physiol.*, 33, 385-396.
- REICHARDT K., BACCHI O. S. S., VILLAGRA M. M., TURATTI A., PEDROSA Z., 1993. Hydraulic variability in space and time in a red latosol of the tropics. *Geoderma*, 60-159-168.
- SAKURATANI T., 1981. A heat balance method for measuring water flux in the stem of intact plants. *J. Agric. Meteorol.*, 37, 9-17.
- SHUTTLEWORTH W. J., 1989. Micrometeorology of temperature and tropical forests. *Philos. Trans. R. Soc. London. Ser. B. Biol. Sci. B* 6, 299-334.
- SWANSON R. H., 1962. An instrument for detecting sap movement in woody plants USDA Forest Service. Fort Collins Station Paper 68, 16 pp.
- SWANSON R. H., 1972. Water transpired by trees is indicated by heat pulse velocity. *Agric. Meteorol.*, 10, 277-281.
- SWANSON R. H., 1994. Significant historical developments in thermal methods for measuring sap flow in trees. *Agric. For. Meteorol.*, 72, 113-132.
- VALANCOGNE C., NASR Z., 1989. Une méthode de mesure du débit de sève brute dans de petits arbres par bilan de chaleur. *Agronomie*, 9, 609-617.
- VILLAGRA M. M., BACCHI O. S. S., TUON R. L., REICHARDT K., 1994. Difficulties of estimating evapotranspiration from the water balance equation. *Agric. For. Meteorol.*, 72: 317-325.