



8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

La **Ciencia forestal** y su contribución a
los **Objetivos de Desarrollo Sostenible**



8CFE

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales

Cataluña | Catalunya - 27 junio | juny - 1 julio | juliol 2022

ISBN 978-84-941695-6-4

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Organiza



Diseño y calibración de un dispositivo de bajo costo para la medición del flujo de savia de árboles

BARRIOS-TRILLERAS, A.¹y LÓPEZ-AGUIRRE, A.M.^{1,2}

¹ Departamento de Ciencias Forestales. Facultad de Ingeniería Forestal. Universidad del Tolima.

² Doctorado en Planificación y Manejo Ambiental de Cuencas Hidrográficas. Facultad de Ingeniería Forestal. Universidad del Tolima.

Resumen

La disponibilidad de agua es el principal factor limitante de la producción forestal, con potencial de provocar disminuciones significativas en la producción de biomasa y, en casos extremos contribuir a la muerte de los árboles. La pérdida de agua por transpiración en las plantas es una consecuencia inevitable de la ganancia de carbono a través de la fotosíntesis. La transpiración de un árbol puede ser estimada a través de la medición de la velocidad del flujo de savia a través del tronco, para lo cual, se requieren dispositivos comerciales altamente complejos y de alto costo. La investigación muestra el desarrollo y calibración de dispositivos de bajo costo para el monitoreo del flujo de savia empleando el método de relación de calor (HRM) en árboles de *Gmelina arborea* en Colombia como proxy de la transpiración a nivel de planta. En el proceso de evaluación del dispositivo fueron utilizadas plantas jóvenes de *G. arborea*, en las que se determinó la traspiración real a través del método gravimétrico. Los valores de Sapflow obtenidos presentan una correlación alta con los valores de transpiración obtenidos gravimétricamente ($R^2 = 0.74$). Estas mediciones de flujo de savia permitirán el seguimiento de parámetros físicos y biológicos importantes en la producción forestal en el actual escenario de cambio climático.

Palabras clave

Flujo de savia, transpiración, internet de las cosas, *Gmelina arborea*, Colombia.

1. Introducción

En la actualidad existe una creciente preocupación sobre los efectos que el emblemático cambio climático tendrá sobre los cultivos agrícolas y forestales (Bhattacharya, 2019). Los escenarios de cambio climático global predicen para muchas regiones un aumento de la temperatura junto con una reducción de las precipitaciones (Mayorga et al., 2011; IPCC, 2014), por lo que se espera que dichas variaciones climáticas afecten también el balance hidrológico. Así mismo, se espera una mayor probabilidad e intensidad de episodios de sequía incluso en áreas que generalmente no estuvieron sujetas a eventos prolongados (Battie-Laclau et al., 2016).

Entre los componentes del ciclo hidrológico, la transpiración de las plantas ocupa un lugar importante. La producción de biomasa vegetal se logra a través de la fotosíntesis y del gasto de agua (transpiración), estos dos procesos se producen simultáneamente, y la entrada del dióxido de carbono y la salida del agua utilizan la misma vía, los estomas en las hojas (Medrano, 2007; Bhattacharya, 2019).

La medición de la transpiración de las plantas se puede realizar a diferentes escalas, siendo a nivel de hoja individual el método más fácil, y por ende el más empleado en las investigaciones principalmente en vivero o invernaderos. Sin embargo, estos métodos, que requieren de equipos especializados y costosos de medición de flujos de gases, tienen la dificultad del escalamiento de los valores obtenidos a nivel de planta entera o de rodal o de cuenca hidrográfica (Miner et al., 2017; Cárdenas et al., 2019). Métodos más robustos de mediciones a nivel de planta incluyen el empleo de lisímetros, los cuales pueden ser utilizados en macetas o árboles de porte pequeño, ya que su funcionamiento requiere conocer el peso del agua transpirada y evaporada del suelo (Howell,

2005; Meissner et al., 2010). Su debilidad es que su empleo se vuelve más complejo si se desea medir la transpiración en árboles de mayor porte. Desde hace unas décadas se ha venido desarrollando métodos más sencillos para medir la transpiración en árboles a partir de la medición de la velocidad del flujo de savia (Sapflow) (Granier, 1987). Las mediciones de la velocidad del flujo de savia se realizan puntualmente, es decir en un solo punto en el fuste del árbol. Sin embargo, existen varios métodos para extraer los resultados a nivel de planta (Hatton, 1990) y, posteriormente, es posible escalarlos a nivel de masa forestal, cuenca hidrográfica o ecosistema, considerando las densidades de plantas y la dominancia de especies (Cárdenas et al., 2019).

El flujo de savia es el movimiento de minerales, nutrientes y agua en el xilema causado por el gradiente potencial desde el suelo (una región de alto potencial hídrico) hasta la atmósfera (una región de bajo potencial hídrico) (Ehsani et al., 2017). El flujo de savia varía según la especie, la hora del día y la época del año. El flujo de savia aumenta cuando ocurre la mayor cantidad de radiación solar (mediodía). Por lo tanto, durante la noche (por debajo de la temperatura de congelación), normalmente ocurre muy poco flujo de savia. Además, los días fríos y nublados disminuirán el flujo de savia debido a la menor incidencia de la luz o la radiación solar en las copas de los árboles (Giménez et al., 2005).

Existen dos aproximaciones generales para la medición de la velocidad del flujo de savia: métodos de calor continuo ó de disipación de calor (Granier, 1987) y los métodos de pulso de calor (Marshall, 1958). La principal diferencia en las dos aproximaciones es que en el primer método se aplica calor continuamente en una aguja (sensor) mientras se registra la diferencia en temperatura entre esta aguja y una aguja sin calentar ubicada a 10 cm más abajo en el xilema (Vandegehuchte y Steppe, 2013). La segunda aproximación se basa en la ecuación de conducción-convección de calor presentada por Marshall (1958). En este caso el calor es aplicado en pulsos de 2 a 6 segundos en una aguja y se registra en otra sonda (o en varias sondas) ubicada a una distancia conocida, la diferencia en temperatura antes y después del pulso durante una ventana de al menos 100 segundos, son usados para determinar la velocidad del flujo de savia (Vandegehuchte y Steppe, 2013). La velocidad del flujo de savia está estrechamente relacionada con la transpiración de la planta, sin embargo, se requiere de un proceso de calibración para convertir eficientemente los valores observados en tasas efectivas de transpiración.

El presente estudio plantea el diseño, desarrollo y calibración de dispositivos de bajo costo para el monitoreo del flujo de savia en árboles individuales como proxy de la transpiración a nivel de planta. Con el desarrollo de estos dispositivos se podrá generar información de alta calidad que permita cuantificar la cantidad de agua usada y requerida por especies forestales para alcanzar producciones óptimas. Consecuentemente, esta información servirá para encontrar alternativas silvícolas y de manejo forestal para hacer frente a las variaciones climáticas cada vez más adversas.

2. Objetivos

Objetivo general del estudio es desarrollar un dispositivo de bajo costo para el monitoreo del flujo de savia (Sapflow) a través del método de la relación de calor (HRM) en árboles individuales como proxy de la transpiración a nivel de planta y de rodal. Se considera un dispositivo de bajo costo porque su valor solo alcanza aproximadamente un 2 a 3 % (USD\$ 50) del valor de un equipo comercial. Objetivos específicos: i) diseñar e implementar un dispositivo de monitoreo del flujo de savia en árboles individuales a partir de sensores térmicos y ii) calibrar el dispositivo de monitoreo de flujo de savia en árboles individuales a través de la relación con mediciones gravimétricas.

3. Metodología

El método empleado para determinar la velocidad del flujo de savia es conocido como método de relación de calor (HRM, Marshall, 1958; Burgess et al., 2001; Forster, 2020). El HRM mide la relación del incremento de temperatura, después de retirar un pulso térmico en puntos equidistantes aguas arriba y abajo de un emisor (Burgess et al., 2001). La velocidad del pulso de calor es calculada usando:

$$v_h = \frac{k}{x} \log \left(\frac{v_1}{v_2} \right) 3600 \quad (1)$$

donde, v_h es la velocidad del pulso de calor (cm h^{-1}), k es la difusividad térmica de la madera verde ($\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$), x es la distancia entre el calentador (usualmente 6 mm) y las sondas de temperatura, v_1 y v_2 son incrementos en temperatura aguas abajo y arriba del calentador, calculados usualmente entre 60 a 80 s después de retirado el pulso de calor.

Los valores de velocidad del pulso de calor se convierten en velocidad del flujo de savia (v_s) a través de la ecuación:

$$v_s = \frac{\rho_b (c_w + m_c c_s)}{\rho_s c_s} v_h \quad (2)$$

donde, ρ_b es la densidad básica de la albura (kg m^{-3}), ρ_s es la densidad de la savia (asumida 1000 kg m^{-3}), m_c es el contenido de humedad de la albura (kg kg^{-1}), c_w y c_s es la capacidad calorífica específica de la madera seca ($1200 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$) y de la savia ($4182 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$), respectivamente (Forster, 2020).

El volumen de savia transpirado (Sapflow) por una planta se obtiene a través del producto entre v_s y el área de la albura (área de tejido conductor). El sensor de flujo de savia consistió de tres sondas, un calentador central y dos sondas de temperatura equidistantes aguas arriba y abajo del emisor. Las sondas fueron hechas con agujas hipodérmicas de acero inoxidable de 1.8 mm de diámetro y de 50 mm de largo. El calentador central fue construido con una resistencia de 38 ohmios de alambre de Ni80Cr20. Cada una de las sondas de temperatura están compuestas de dos termistores localizados a 10 y 20 mm desde la punta de la sonda (Figura 1).

Las temperaturas fueron registradas en un colector de datos (Figura 1) construido alrededor de un procesador atmega328p y un conversor MCP3421 (Microchip Technology Inc.), el cual convierte las señales análogas en señales digitales a través del puerto I²C con una resolución de 16bits (aproximadamente 0.0025 °C). El pulso de calor (~4 Watts, 12 voltios) fue controlado por un MOSFET (FQP30N06L, Fairchild Semiconductor, Sunnyvale, CA, USA, Figura 1). El ciclo de trabajo del dispositivo fue configurado para medir las sondas de temperatura durante 20 segundos, luego, se aplicó un pulso de calor durante tres segundos, y posteriormente se continuó registrando las temperaturas durante 180 segundos adicionales. El ciclo se repite cada 15 minutos (4 veces por hora).

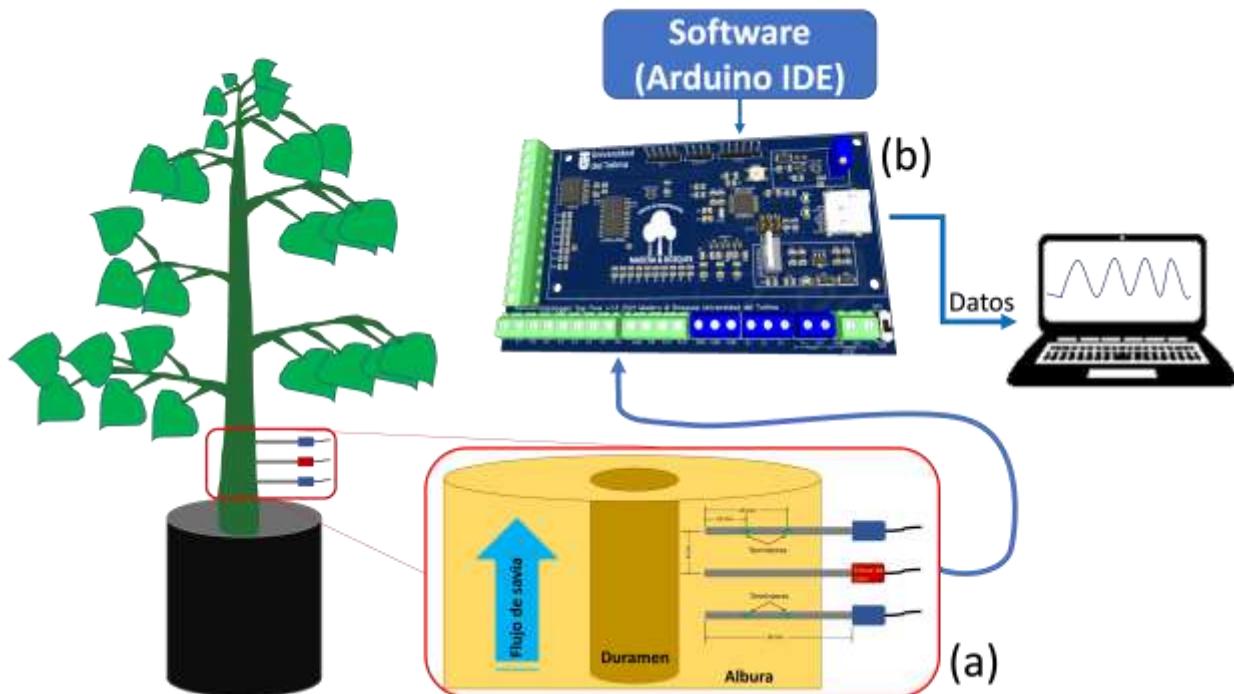


Figura 1. Esquema metodológico empleado para la medición de flujo de savia. (a) sensor de flujo de savia y (b) colector de datos diseñado.

La evaluación del sensor consistió en la comparación de los valores de Sapflow obtenidos simultáneamente a través del sensor y de la medición de la transpiración a través del método gravimétrico. Se emplearon tres plantas jóvenes (un año de edad) de *Gmelina arborea* cultivadas en macetas de 20 litros de sustrato homogéneo con diámetros en la base de 33, 36 y 37 mm y un promedio de 1.5 metros de altura. *Gmelina arborea* es una especie arborea de rápido crecimiento originaria del sudeste asiático, la ha sido introducida a países tropicales de Latinoamérica. La especie se adapta a zonas secas y ha registrado incrementos medios anuales hasta $60.63 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Barrios-Trilleras et al., 2021).

Antes de cada medición, el sustrato de la planta fue puesto en capacidad de campo, posteriormente, se cubrió con plástico para evitar las pérdidas de agua por evaporación. Posteriormente, la planta se posicionó sobre una balanza con precisión 0.1 g conectada directamente al colector de datos y se registró cada 15 minutos, el Sapflow, el peso, y adicionalmente, la temperatura, humedad relativa (HR) y radiación fotosintéticamente activa (RFA). Posteriormente, la misma secuencia fue repetida con las otras plantas. Los datos fueron analizados empleando gráficos de series, correlación y regresión lineal utilizando SAS (SAS Institute Inc., 2018).

4. Resultados

Funcionamiento del dispositivo

La figura 2 muestra un ciclo de medición del dispositivo, en el cual se observa las temperaturas registradas antes y después de la aplicación del pulso de calor. Los datos demuestran la precisión del dispositivo de bajo costo en la medición de temperaturas. La figura 2 describe en los cuatro termistores un comportamiento creciente hasta alcanzar una temperatura máxima y luego desciende linealmente hasta volver a la temperatura inicial.

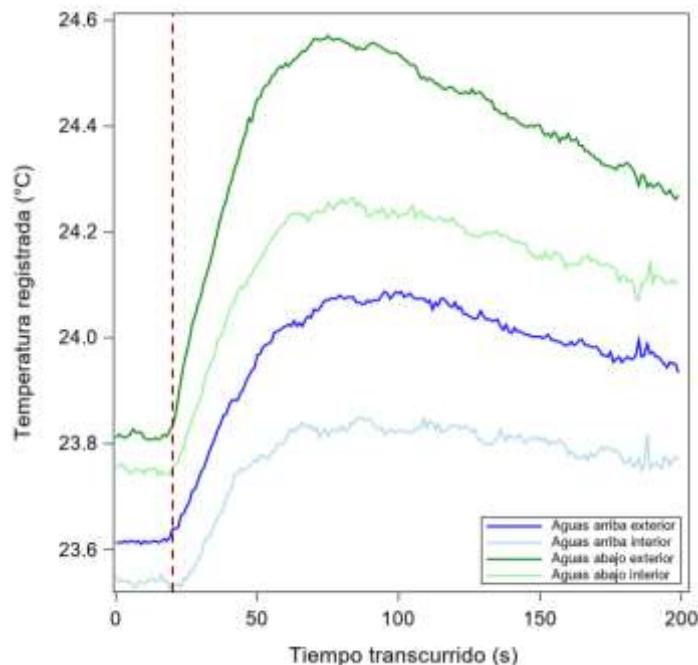


Figura 2. Ejemplo de temperaturas colectadas en cada ciclo de medición. La línea vertical marrón indica el momento de aplicación del pulso de calor (20 s).

Evaluación del dispositivo

Las plantas de *Gmelina arborea* presentaron velocidades de pulso de calor relativamente bajas ($< 9.48 \text{ cm h}^{-1}$) y una velocidad de fujo de savia máxima de $6.83 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$. En el proceso de evaluación del dispositivo se observó una correspondencia entre los valores de transpiración obtenidos gravimétricamente mediante el uso de una balanza y los obtenidos a través del sensor de Sapflow (Figura 3). La tasa de transpiración media medida a través del dispositivo fue de $13.7 \text{ cm}^3 \text{ h}^{-1}$ y la registrada en la balanza fue de $12.9 \text{ cm}^3 \text{ h}^{-1}$.

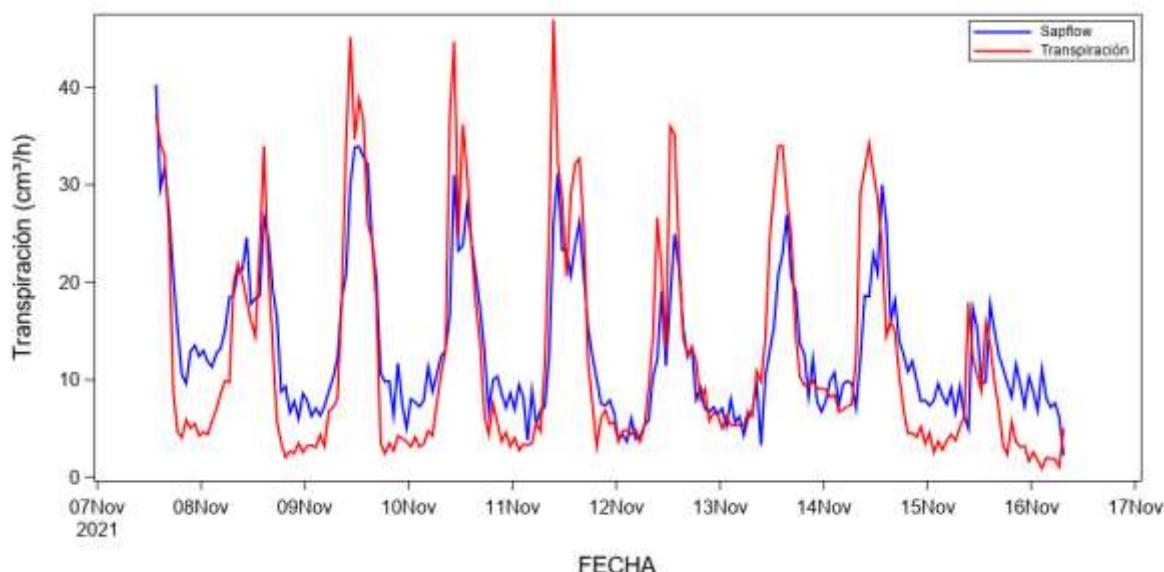


Figura 3. Comportamiento del Sapflow frente a la transpiración observada para una planta de *Gmelina arborea* medida entre el 07 y 17 de noviembre de 2021.

Los valores de Sapflow obtenidos en la medición de las tres plantas de *Gmelina arborea* frente a los valores de transpiración observados son presentados en la figura 4. Los datos presentan una relación de tipo lineal con $R^2=0.74$, sin embargo, los datos muestran que el dispositivo tiende a subestimar los valores máximos y a sobreestimar los valores mínimos de transpiración.

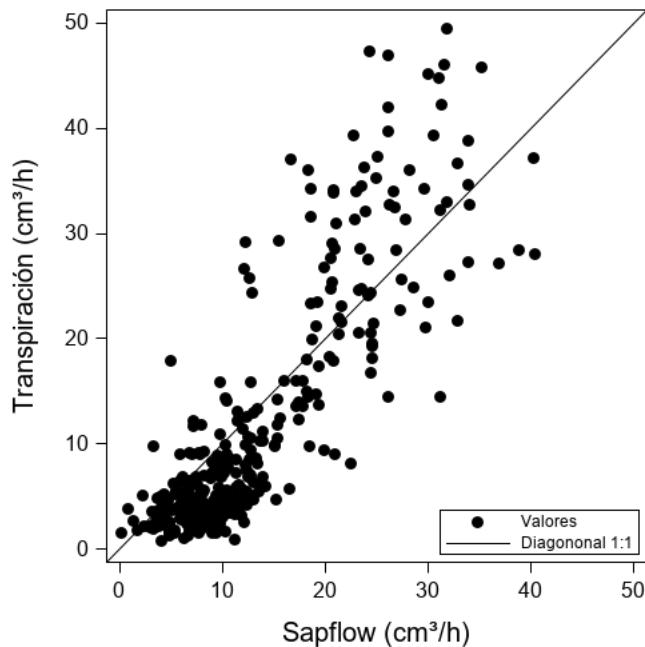


Figura 4. Transpiración observada frente al Sapflow calculado.

Un análisis de correlación mostró que las tasas de transpiración se correlacionan significativamente ($P < 0.0001$) con todas las variables climáticas medidas en el estudio (Tabla 1). La transpiración presentó una correlación negativa con la humedad relativa ($r = -0.69$) y positiva con temperatura ($r = 0.73$), déficit de presión de vapor (VPD, $r = 0.77$) y radiación fotosintéticamente activa (RFA, $r = 0.86$).

Tabla 1. Coeficientes de correlación lineal entre la transpiración gravimétrica y Sapflow y demás variables climáticas ($n=353$).

Variable	Sapflow	HR	Temperatura	VPD	RFA
Transpiración gravimétrica	0.86***	-0.69***	0.73***	0.77***	0.86***
Sapflow		-0.66***	0.72***	0.69***	0.74***
HR			-0.77***	-0.98***	-0.56***
Temperatura				0.82***	0.63***
VPD					0.62***

***: significante al $P < 0.0001$.

5. Discusión

El método HRM mostró ser eficiente en la estimación de las tasas de transpiración (Sapflow). Estudios realizados por Forster (2020) han demostrado que el método HRM funciona bien en la medición de tasas bajas de transpiración. El autor reportó un R^2 de 0.54 en la determinación de las tasas de transpiración en 15 especies leñosas usando el método HRM. En el presente estudio los valores obtenidos con el método HRM y el dispositivo de bajo costo construido permitió obtener una

relación lineal ($R^2 = 0.74$) entre la transpiración gravimétrica y el flujo de savia en plantas jóvenes de *Gmelina arborea*.

Los valores de velocidad del flujo de savia registrados en el estudio son más bajos a los reportados para *Gmelina arborea* en condiciones de plantación en Panamá empleando el método de disipación de calor (Kunert et al., 2010). Los autores registraron velocidades de flujo de savia máximas de $20 \text{ cm}^3\text{cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ mientras que en el presente estudio se obtuvieron valores máximos de $6.83 \text{ cm}^3\text{cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Estas discrepancias pueden explicarse en las diferencias en los tamaños de las plantas evaluadas y en las condiciones ambientales de los sitios de estudio.

Las correlaciones reportadas con las variables climáticas concuerdan con estudios previos de Zeppel et al. (2004), donde se reportó que las fuerzas que controlan la transpiración en las plantas están relacionadas con la radiación y el déficit de precios de vapor en la atmósfera. Aumentos de la radiación solar y del VPD están relacionados con aumento en las velocidades del pulso de calor y por consiguiente de las tasas de transpiración.

6. Conclusiones

El dispositivo de bajo costo construido empleando el método de relación de calor (HRM) funcionó adecuadamente para estimar las tasas de transpiración. En el presente estudio fueron estimadas las tasas de transpiración en plantas jóvenes de *Gmelina arborea*, la cual se podría considerar, de acuerdo a los resultados obtenidos, como especie con tasas de transpiración bajas ($< 6.83 \text{ cm}^3\text{cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Los valores de Sapflow obtenidos presentan una correlación alta con los valores de transpiración obtenidos gravimétricamente ($R^2 = 0.74$).

7. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Oficina de Investigación y Desarrollo Científico de la Universidad del Tolima el apoyo financiero concedido para desarrollar la investigación a través del proyecto No 380120. Los autores también agradecen el apoyo ofrecido por el grupo de investigación Madera & Bosques de la Universidad del Tolima.

8. Bibliografía

BARRIOS-TRILLERAS, A.; LÓPEZ-AGUIRRE, A.M.; BÁEZ-APARICIO, C.A. 2021. Modelamiento de la productividad de *Gmelina arborea* Roxb. con base en variables biofísicas y de rodal. *Colomb For* 24(1) 71-87

BATTIE-LACLAU, P.; A, DELGADO-ROJAS, J.S.; CHRISTINA, M.; NOUVELLON, Y.; BOUILLET, J.P.; PICCOLO, M.C.; MOREIRA, M.Z.; GONÇALVES, J.L.M.; ROUPSARD, O.; LACLAU, J.P. 2016. Potassium fertilization increases water-use efficiency for stem biomass production without affecting intrinsic water-use efficiency in *Eucalyptus grandis* plantations. *For Ecol Manag* 364 77–89

BHATTACHARYA, A. 2018. Changing climate and resource use efficiency in plants. Academic Press. 324 p

BURGESS, S.S.O.; ADAMS, M.A.; TURNER, N.C.; BEVERLY, C.R.; ONG, C.K.; KHAN, A.A.H.; BLEBY, T.M. 2001. An improved heat pulse method to measure low and reverse rates of sap flow in woody plants. *Tree Physiol* 21 589–598.

CÁRDENAS, M.F.; LÓPEZ-RAMÍREZ, C.; MEJÍA, J.D.; ESCOBAR, J.F. 2019. Design and implementation of a low-cost device for measuring sap flow in woody species. *DYNA* 86(208) 214-220.

EHSANI, R.; ALIZADEH, A.; KADYAMPAKENI, D. 2017. Monitoring tree health using water-uptake rate. Citrus Industry Magazine. En Línea: <https://citrusindustry.net>

FORSTER, M.A. 2020. The importance of conduction versus convection in heat pulse sap flow methods. *Tree Physiol* 00 1–12

GIMÉNEZ, C.; GALLARDO, M.; THOMPSON, R.B. 2005. Plant–water relations. In: Encyclopedia of Soils in the Environment 231-238

GRANIER, A. 1987. Mesure du flux de sève brute dans le tronc du Douglas par une nouvelle méthode thermique. *Ann sci for* 44 1–14

HATTON, T. 1990. Integration of sap flow velocity to estimate plant water use. *Tree Physiol* 6 201–209

HOWELL, T.A. 2005. Lysimetry. Encyclopedia of Soils in the Environment, 379–386

IPCC. 2014. Climate Change 2014: synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [CoreWriting Team, RK. Pachauri and LA Meyer (eds)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p.

KUNERT, N.; SCHWENDENMANN, L.; HÖLSCHER, D. 2010. Seasonal dynamics of tree sap flux and water use in nine species in Panamanian forest plantations. *Agric For Meteorol* 150 411–419.

MARSHALL, D.C. 1958. Measurement of sap flow in conifers by heat transport. *Plant Physiol* 33 385–396.

MAYORGA, R.; HURTADO, G.; BENAVIDES, H. 2011. Evidencias de cambio climático en Colombia con base en información estadística. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, Bogotá, 47 p.

MEDRANO, H.; BOTA, J.; CIFRE, J.; FLEXAS, J.; RIBAS-CARBÓ, M. 2007. Eficiencia en el uso del agua por las plantas. *Invest. Geogr* 43 63-84.

MEISSNER, R.; RUPP, H.; SEEGER, J.; OLLESCH, G.; GEE, G.W. 2010. A comparison of water flux measurements: passive wick-samplers versus drainage lysimeters. *Eur J Soil Sci* 61 609–621

MINER, G.L.; HAM, J.M.; KLUITENBERG, G.J. 2017. A heat-pulse method for measuring sap flow in corn and sunflower using 3D printed sensor bodies and low-cost electronics. *Agric For Meteorol* 246 86–97.

SAS INSTITUTE INC. 2018. SAS/STAT® 15.1 User's Guide. SAS® Publishing. 10798 pg. Cary, NC.

VANDEGEHUCHTE, M.W.; STEPPE, K. 2013. Sap-flux density measurement methods: working principles and applicability. *Funct Plant Biol* 40 213–223.

ZEPPEL, M.J.B.; MURRAY, B.R.; BARTON, C.; EAMUS, D. 2004. Seasonal responses of xylem sap velocity to VPD and solar radiation during drought in a stand of native trees in temperate Australia. *Funct Plant Biol* 31 461–470.