

Trabajo Fin de Máster

Construcción y Calibración de Sensores para la medición del Flujo de Savia en el cálculo de la Transpiración mediante el Método HRM

Intensificación:

ORDENACIÓN, RESTAURACIÓN Y GESTIÓN DE CUENCAS

Autor:

JUAN RAMÓN TORRES SÁNCHEZ

Tutor:

DR. ANTONIO D. DEL CAMPO GARCÍA

Cotutor/es:

Director Experimental:

MARZO, 2017



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma



Resumen del Trabajo de Fin de Máster

Datos del proyecto

Título del TFM en español: Construcción y calibración de sensores para la medición del flujo de savia en el cálculo de la transpiración mediante el método HRM.

Título del TFM en inglés: Construction and calibration of sensors for measurement of sap flow in the calculation of perspiration by the HRM method.

Título del TFM en Valenciano: Construcció i calibratge de sensors per al mesurament del flux de saba en el càlcul de la transpiració per mitjà del mètode HRM.

Alumno: JUAN RAMÓN TORRES SÁNCHEZ.

Tutor: DR. ANTONIO D. DEL CAMPO GARCÍA

Cotutor/es:

Director experimental:

Fecha de Lectura: MARZO, 2017

Resumen

En español (máximo 5000 caracteres)

La cuantificación de la transpiración se presenta como una herramienta fundamental en la silvicultura adaptativa. La construcción de sensores de flujo de savia precisos a bajo coste constituye un objetivo prioritario como paso previo a la realización de toma de datos masivos en campo. El presente trabajo recoge el proceso de construcción y calibración de estos sensores así como su comparación con el único sistema comercial existente actualmente. Los resultados avalan la conveniencia de realizar este tipo de sensores para la medición del flujo de savia.

En valenciano (máximo 5000 caracteres)

La quantificació de la transpiració es presenta com una ferramenta fonamental en la silvicultura adaptativa. La construcció de sensors de flux de saba precisos a baix cost constitueix un objectiu prioritari com a pas previ a la realització de presa de dades massives en camp. El present treball recull el procés de construcció i calibratge d'estos sensors així com la seua comparació amb l'únic sistema comercial existent actualment. Els resultats avalen la conveniència de realitzar aquest tipus de sensors per al mesurament del flux de saba.

En inglés (máximo 5000 caracteres)

The quantification of perspiration is presented as an essential tool in adaptive forestry. The construction of precise sap flow sensors at low cost is a priority objective previous to the completion of massive data collection in field. This work includes the construction process and calibration of these sensors as well as its comparison with the only existing commercial system at present. The results support the convenience of making this kind of sap flow sensor.

Palabras clave español (máximo 5): Método de impulso de calor; Flujo de savia; desarrollo de sensores

Palabras clave valenciano (máximo 5): Mètode d'impulso de calor; Flux de saba; desenvolupament de sensors

Palabras clave inglés (máximo 5): Heat ratio Method; sap flow; environmental sensors

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	7
Descripción general del HRM	11
OBJETIVOS	15
Objetivo general	15
Objetivos específicos	15
MATERIALES Y MÉTODOS	17
Fabricación de sondas: Termopares tipo E y calentadores	17
Sistema de calibración	21
Instalación en campo	25
Análisis de datos	30
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	31
Fabricación de sondas: Termopares tipo E y calentadores	31
Sistema de calibración	35
Instalación en campo	37
Análisis de los datos	40
CONCLUSIONES	51
TRABAJOS FUTUROS	53
BIBLIOGRAFÍA	55
Índice de Ilustraciones	
ILUSTRACIÓN 1.- ESQUEMA DEL FUNCIONAMIENTO Y ESTRUCTURA DE LOS SENSORES DE FLUJO DE SAVIA (DE MANUAL ICT INTERNATIONAL). LOS TERMOPARES EXTERIORES ESTÁN REPRESENTADOS POR LAS LETRAS A Y C Y LOS INTERIORES POR B Y D.	11
ILUSTRACIÓN 2.- DETALLE DE LA INSTALACIÓN DE LOS SENSORES DE FLUJO DE SAVIA EN CAMPO	13
ILUSTRACIÓN 3.- REPRESENTACIÓN DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA INSERCIÓN DE UN SENSOR DE FLUJO DE SAVIA EN UN TRONCO. SE PRESENTAN CADA PAR DE TERMOPARES CON LÍNEAS HORIZONTALES. A SU VEZ, ESTÁN REPRESENTADAS LAS ÁREAS DE CADA PAR DE TERMOPARES (ÁREA PUNTEADA PARA LOS EXTERNOS, ÁREA VACÍA PARA LOS INTERNOS).	14
ILUSTRACIÓN 4.-VISTA GENERAL DEL LABORATORIO	17
ILUSTRACIÓN 5.- MONTAJE DE LOS TERMOPARES. TRABAJOS DE SOLDADURA.	19
ILUSTRACIÓN 6.- ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE LA BOTELLA DE MARIOTTE	21
ILUSTRACIÓN 7.- BOTELLA DE MARIOTTE UTILIZADA EN LA CALIBRACIÓN DE LOS EQUIPOS. EN EL TUBO DE METACRILATO TRANSPARENTE SE APRECIA UN SUSTRATO FORMADO POR SERRÍN DE HAYA CONFINADO ENTRE CORCHO VERDE.	23
ILUSTRACIÓN 8.- HERRAMIENTAS UTILIZADAS PARA LA INSTALACIÓN EN CAMPO DE LOS EQUIPOS DE HRM	25
ILUSTRACIÓN 9.- MONTAJE DEL DATALOGGER, MULTIPLEXOR, FUENTE DE ALIMENTACIÓN Y RELÉ EN UNA CAJA ACOLCHADA PARA SU TRANSPORTE A CAMPO.	26
ILUSTRACIÓN 10.- EJECUCIÓN DE LOS TALADROS A TRAVÉS DE LA PLACA GUÍA.	26

ILUSTRACIÓN 11.- CARTEL DEL GRUPO DE INVESTIGACIÓN INSTALADO EN LA PUERTA DE ACCESO A LA PARCELA DE EXPERIMENTACIÓN.	27
ILUSTRACIÓN 12.- VISTA GENERAL DE LA PARCELA.	28
ILUSTRACIÓN 13.- DATALOGGER DE ICT	29
ILUSTRACIÓN 14.- SENSOR DE ICT	29

Índice de Gráficos

GRÁFICO 1.- TEMPERATURAS MEDIDAS POR LOS TERMOPARES FABRICADOS	32
GRÁFICO 2.- DETALLE DE LA EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA MEDIDA POR LOS TERMOPARES FABRICADOS	33
GRÁFICO 3.- RESPUESTA DE LOS TERMOPARES FABRICADOS FRENTE A LOS IMPULSOS DE CALOR GENERADOS POR LOS CALENTADORES.	34
GRÁFICO 4.-EVOLUCIÓN DE LAS TEMPERATURAS MEDIDAS POR LO DIFERENTES SENSORES A LO LARGO DE 24 HORAS CON MEDICIONES CADA 30 SEGUNDOS CON PULSOS DE CALOR DE 3 SEGUNDOS CADA 5 MINUTOS	35
GRÁFICO 5.- DETALLE DE LA VARIACIÓN DE TEMPERATURAS MEDIDAS EN EL SISTEMA DE CALIBRACIÓN	36
GRÁFICO 6.- DETALLE DE LA DIFERENCIA DE LOS INCREMENTOS DE TEMPERATURA EN CADA UNO DE LOS JUEGO DE SENSORES	36
GRÁFICO 7.- VELOCIDADES DE FLUJO DE SAVIA OBTENIDOS DE LOS SENSORES COLOCADOS EN EL MONTE DE LA HUNDE.	38
GRÁFICO 8.- COMPARATIVA DE LOS VALORES DE VELOCIDAD DE LOS DIFERENTES GRUPOS	38
GRÁFICO 9.- VELOCIDADES DE FLUJO DE SAVIA DE LOS DIFERENTES EQUIPOS UNA VEZ SE A APLICADO EL ALGORITMO DE SUAVIZADO A LOS FABRICADOS EN LA UPV. EL ALGORITMO UTILIZADO A SIDO $A_N = (A_N + ((A_{N-1} + A_{N+1})/2))/2$ APLICADO CUATRO VECES CONSECUTIVAS.	39
GRÁFICO 10.- DETALLE DEL GRÁFICO ANTERIOR (9). SE PUEDE OBSERVAR LA MENOR OSCILACIÓN DE LOS DATOS DE VELOCIDAD Y LA MAYOR VARIABILIDAD DE LOS MISMOS EN EL EQUIPO DE ICT..	41
GRÁFICO 11.- VALORES OBTENIDOS APLICANDO EL ALGORITMO DE SUAVIZADO A LOS DATOS OBTENIDOS POR NUESTRO SISTEMA. SE PUEDE OBSERVAR QUE DESAPARECEN LOS SALTOS OBTENIÉNDOSE UNOS VALORES APARENTEMENTE MENOS ERRÁTICOS EN LA LÍNEA DE LOS OBTENIDOS POR EL SISTEMA DE ICT	42
GRÁFICO 12.- COMPARATIVA ENTRE LOS VALORES BRUTOS Y LOS SUAVIZADOS (UNA SOLA APLICACIÓN DEL ALGORITMO CITADO) EN LOS SENSORES UPV	42
GRÁFICO 13.- MEDIAS DIARIAS DE VELOCIDADES Y TEMPERATURA	44
GRÁFICO 14.- MÁXIMAS DIARIAS DE VELOCIDADES Y TEMPERATURA	44
GRÁFICO 15.- MÍNIMAS DIARIAS DE VELOCIDADES Y TEMPERATURA	44
GRÁFICO 16.- VALORES DE VELOCIDAD (VS) Y DPV	45
GRÁFICO 17.- MEDIAS DIARIAS DE VS Y DPV	46
GRÁFICO 18.- MÁXIMAS DIARIAS DE VS Y DPV	46
GRÁFICO 19.- MÍNIMAS DIARIAS DE VS Y DPV	46

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.- COSTE DE LOS MATERIALES UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE SISTEMA HRM	31
TABLA 2 .- ANÁLISIS NUMÉRICO DE LAS VELOCIDADES OBTENIDAS POR LOS DIFERENTES EQUIPOS HRM	40
TABLA 3.- DATOS CLIMÁTICOS RECOGIDOS EN LA ZONA DURANTE LOS DÍAS DE ESTUDIO.	43
TABLA 4.- PRUEBAS DE LOS EFECTOS INTER-SUJETOS	47
TABLA 5.- COMPARACIONES POR PARES	48

INTRODUCCIÓN

El desarrollo económico y el aumento de población tienen como consecuencia, entre otros muchos aspectos, un importante aumento del consumo de agua, lo que genera numerosos conflictos entre la población (ONU, 2009; Vorosmarty et al., 2000). A los ritmos actuales de crecimiento, se calcula que, a nivel global, para 2025 el ratio consumo hídrico vs escorrentía será en torno a un 120% superior al actual (Vorosmarty et al., 2000), a lo que habría que sumar los esperados efectos del cambio climático en la zona mediterránea (IPCC, 2007), así como los déficits estructurales que ya existen en esta zona (Estrela et al., 2000). Todo ello, nos presenta un panorama complejo que, en cualquier caso, parece recomendar un aumento de la eficiencia en la gestión de los recursos hídricos.

El campo de la gestión de cuencas forestales y/o de cabecera, puede contribuir en este intento a través de la selvicultura hidrológica. La evidencia científica ha puesto en entredicho la opinión generalizada de que a mayor biomasa mayor disponibilidad de agua (Calder, 2003). Es indudable el efecto beneficioso que los bosques tienen sobre la calidad, la erosión, el control de avenidas, etc. (Brooks et al., 2003), pero si hablamos de cantidad, la cosa no está tan clara: es evidente que cuanto más vegetación exista mayor transpiración e interceptación, por lo que, en determinadas circunstancias podría reducirse la escorrentía y la infiltración a los acuíferos.

La transpiración es uno de los procesos hídricos fundamentales a nivel global, representando entre un 80 y un 90 % de la evapotranspiración total terrestre (Jasechko et al., 2013). En los ecosistemas mediterráneos, puede suponer hasta tres cuartas partes del total de la precipitación anual, que oscila entre 100 y 200 mm por unidad de LAI (Llorens et al., 2011). Es por ello que se hace necesario comprender su papel en los flujos de agua dentro del sistema suelo-vegetación-atmósfera para adoptar medidas proactivas en el uso y gestión de los ecosistemas forestales en el ámbito del cambio global (Asbjornsen et al., 2011). Esta situación es tanto más importante cuanto más árida sea la zona a estudiar: Los recursos hídricos en zonas semiáridas ya han sufrido afectaciones importantes por el crecimiento económico y la expansión urbana, poniendo en peligro su futuro (García-Ruiz et al., 2011).

En este punto, hay que resaltar la vulnerabilidad de los bosques mediterráneos (Lindner et al, 2010) y, en particular, aquellos de origen artificial tales como las repoblaciones forestales, sobre todo de *Pinus halepensis* Mill. (Pino carrasco) que llegan a ocupar medio millón de hectáreas en la España mediterránea. En estas zonas es fundamental aplicar la gestión adaptativa (Fitzgerald et al, 2013; Ungar et al, 2013). Las prácticas silvícolas tendientes a reducir la biomasa, como claras o clareos, pueden mejorar la capacidad de adaptación y resiliencia de estos bosques al tiempo que equilibrar la disponibilidad de agua azul y verde: es decir, la disponibilidad entre el agua disponible en el sustrato y en la planta (Birost y Gracial, 2011; Molina y del Campo, 2012).

Con todo ello, es necesario implementar las herramientas cuantitativas adecuadas que nos permitan estimar los diferentes flujos de agua dentro de un ecosistema para poder llevar a cabo una selvicultura de orientación hidrológica que nos permita cuantificar y manipular los componentes del ciclo hidrológico y definir las actividades a realizar en los bosques con objetivos de gestión.

Son muchas las disciplinas científicas que han contribuido al desarrollo de la estimación de la transpiración de los bosques (fisiología vegetal, ecología, meteorología, hidrología, edafología...) pero cada una de ellas se ha acercado con sus propios métodos y técnicas de estudio adaptados a sus propios intereses, lo que genera un gran número de modelos y métodos (Asbjornsen et al, 2011). En este sentido, los métodos eco-fisiológicos están más orientados al estudio del movimiento del agua dentro de la planta, lo que permite obviar el resto de flujos implicados en la evapotranspiración total como pueden ser la evaporación del suelo o la interceptación, por lo que, en principio, nos proporciona una medida más exacta, ya que no hemos de realizar la estimación de estos valores (Shichun et al, 2010).

Es en este contexto donde el método Sap flow (flujo de savia) se presenta como un método fiable para la estimación de la transpiración, ya que permite estimar el agua que circula por el tronco o tallo de las plantas. El método Sap flow estima de manera indirecta la transpiración de los árboles (Zeppel et al, 2008; Asbjornsen et al, 2011).

El principal inconveniente de este método se deriva de su sofisticación experimental, ya que se trata de un método difícil de implementar y manejar desde un punto de vista práctico. Además de los problemas inherentes a la utilización de aparatos electrónicos en campo (mal

funcionamiento con pérdida de datos, fallos de energía, poca representatividad temporal y espacial...), los datos obtenidos necesitan un pos proceso que compense las desviaciones producidas por las características fisiológicas de la planta (variaciones radiales y azimutal del flujo de savia y otros supuestos asociados a esta metodología) y las derivadas de la propia medición, ya que se trata de un método intrusivo (alteración en la albura, heridas, etc.) (Burgess et al., 2001, Cohen y Cohen, 2008). Para compensar estos problemas, es práctica común el desarrollo de modelos empíricos a partir de los datos obtenidos (MacKay et al, 2012; Whitley et al, 2012), si bien tienen la limitación de todos los métodos empíricos: que la especie, la zona y las características del rodal donde se obtiene el modelo no difieran sustancialmente de la especie, la zona y las características del rodal objeto de nuestra investigación.

De entre los diferentes métodos para la medición del flujo de savia, el HRM (Heat Ratio Method o Método del Cociente Calórico) es el que mejor se adapta a las condiciones mediterráneas, ya que permite detectar velocidades bajas e incluso nulas, así como velocidad reversa del flujo de savia, lo que lo convierte en el sistema óptimo para ecosistemas áridos y en situaciones de sequía.

Desarrollado por la Universidad Occidental de Australia (University of Western Australia) junto a organizaciones asociadas como el ICRAF y CSIRO, el Método del Cociente Calórico es una mejora del Método de Compensación del Pulso de Calor (CHPM- Compensation Heat Pulse Method).

El sistema HRM consta de 3 agujas o sondas: La superior e inferior son sensores (termopares) que detectan la temperatura de la savia, mientras que la aguja central es un calentador que genera de forma uniforme e intermitente un pulso de calor a través de la albura. De esta forma, y a través de la diferencia en el incremento de la temperatura detectada por cada sonda, se puede calcular la velocidad de flujo de calor. Estos datos de temperatura son recogidos por un colector de datos (datalogger) y transmitidos a un ordenador donde se almacenan y analizan los datos.

Uno de los problemas que presenta este sistema es, sin duda, su alto coste, ya que sólo existe un fabricante a nivel mundial (ICT) y cada juego de sensores cuesta alrededor de los 800 €, a lo que hay que añadir el precio del Datalogger, las baterías o paneles solares que se

encargan de suministrar energía al sistema, el software, etc. En la experiencia realizada por el grupo Re-ForeST del IIAMA de la Universidad Politécnica de Valencia en pinares de la Hude (Valencia), los equipos necesarios para realizar un estudio en 16 árboles tuvo un coste superior a los 25.000 € (del Campo, com. personal).

Se plantea, por tanto, como solución a este problema y objetivo de este trabajo, la auto-construcción del sistema a partir de elementos estándar de fácil y económica adquisición.

Descripción general del HRM

En los trabajos realizados en el citado estudio de la Hunde, se utilizó el sistema desarrollado y comercializado por ICT International (Australia). Este método estima la transpiración mediante sensores de flujo de savia, basados en el Heat-Ratio Method (Burgess et al., 2001). Dentro de la gran variedad de sensores de flujo de savia basados en la propagación de un pulso de calor artificial dentro de una superficie conductora, el aquí descrito se centra en la medición de la velocidad de propagación de dicho pulso. El método supone que la propagación del calor dentro del tronco del árbol se debe al flujo ascendente de agua por el tejido xilemático, como consecuencia de la transpiración. El calor es emitido por una resistencia (acoplada a una aguja). A la misma distancia aguas arriba y aguas abajo de la resistencia, se localizan otras dos agujas, en las que se encuentran los medidores de temperatura (termopares) a dos profundidades (dos termopares por aguja). Los termopares son los encargados de captar el aumento de la temperatura (véase Figura;1.).

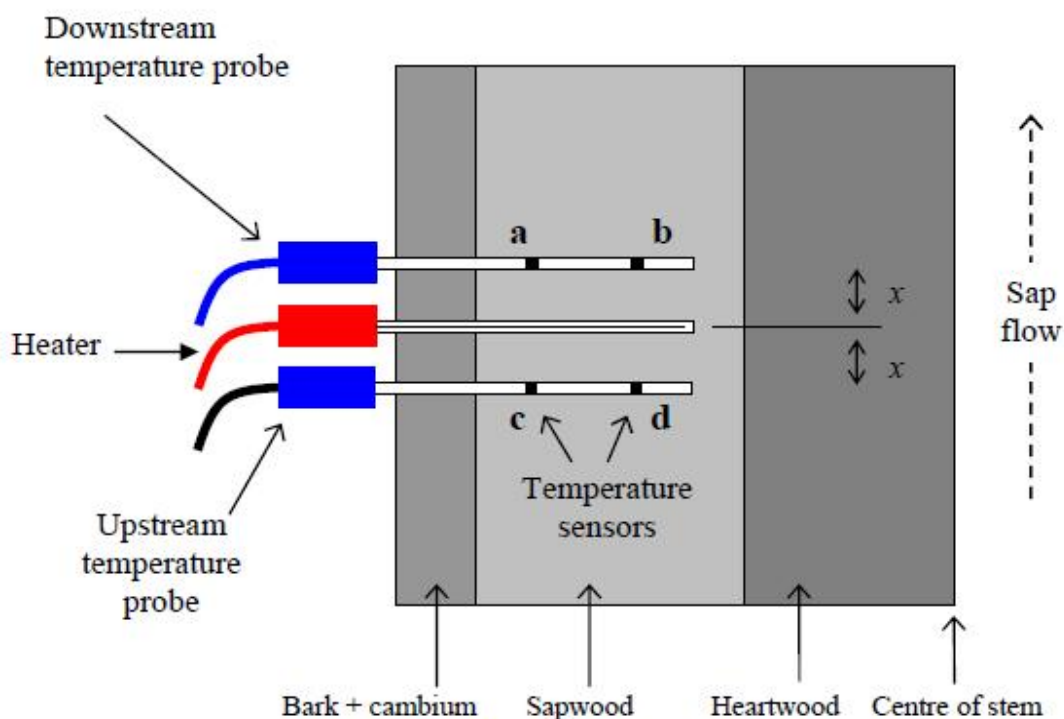


Ilustración 1.- Esquema del funcionamiento y estructura de los sensores de flujo de savia (de Manual ICT International). Los termopares exteriores están representados por las letras a y c y los interiores por b y d.

Una vez transcurrido un tiempo inicial tras la emisión del pulso de calor (periodo de estabilización de la temperatura), los termopares captan el aumento de la temperatura, de manera que, conociéndose la distancia entre éstos y la aguja emisora (0,5 cm), es posible calcular la velocidad para cada uno de ellos. Siendo v_1 función de la velocidad ascendente calculada en los termopares (a y b) de la aguja localizada "aguas abajo", y v_2 de la velocidad de los termopares "aguas arriba" (c y d), se estima la velocidad del pulso de calor (V_h) para cada profundidad (externa e interna) con la ecuación que se especifica a continuación (Marshall, 1958):

$$V_h = \left(\frac{K}{X} \right) \text{Ln} \left(\frac{v_1}{v_2} \right) 3600$$

Dónde: V_h es la velocidad del pulso de calor (cm); K es la difusividad térmica de la madera verde (cm^2/s); x es la distancia que separa el foco emisor de los termopares (cm); v_1 es el incremento de temperatura en el termopar situado "aguas abajo" (a favor de flujo ascendente); v_2 es el incremento de temperatura en el termopar situado "aguas arriba". Nótese que en el caso de que no exista transpiración (por ejemplo, en noches de invierno con temperaturas menores a 7°C), v_1 y v_2 serán iguales, de manera que la velocidad del pulso de calor resultante será nula ya que sólo se deberá a la propagación del calor por conducción.

Previamente a la instalación de los sensores en los árboles seleccionados para tal efecto, hay que recoger cierta información (véase Burgess et al., 2001 para mayor detalle): En primer lugar, puesto que los datos de velocidad estimados deben integrarse sólo a la sección conductora del tronco, para el cálculo de flujo (Q , volumen/tiempo), es necesario conocer si los árboles a muestrear disponen de madera no conductora (duramen). Para ello, es necesario tomar muestras del tronco con barrena Pressler o bien derribar árboles en zonas aledañas a los tratamientos para descartar la presencia de duramen. En segundo lugar, el empleo del método pasa por conocer ciertos parámetros necesarios para:

1. El cálculo de la difusividad térmica de la madera de la especie objeto de estudio

2. La conversión de V_h en velocidad de flujo de savia, V_s (Barret et al., 1995), ya que la primera no tiene en cuenta el medio en el que se está propagando el pulso de calor (para conocer las fórmulas empleadas en estos cálculos, véase Burgess et al., 2001).

Para la obtención de dichos parámetros, es necesario extraer muestras de madera de un número suficiente de árboles de la misma especie en zonas colindantes. Las muestras se recolectan a 1,30 m de altura mediante barrena de Pressler.



Ilustración 2.- Detalle de la instalación de los sensores de flujo de savia en campo

Una vez recolectada la información requerida previa a la instalación, se calcula el área de xilema funcional de cada árbol seleccionado, con objeto de poder extrapolar las mediciones puntuales de velocidad de flujo de savia (V_s , cm/h) a flujo de savia (Q , cm³/h), teniendo en cuenta las mediciones en cada par de termopares (a las dos profundidades). Para ello, se

realizan mediciones directas de los diámetros y del espesor de corteza. Una vez calculada el área de xilema funcional de cada árbol, ésta se subdivide en dos, de manera que la velocidad de flujo de savia para el par de termopares externos (en la ilustración 1 representados como a y c) representará la sección que va desde el exterior del tronco hasta el punto medio entre los termopares (en la ilustración 3, el área punteada), mientras que para los termopares internos la sección será el área restante (en la ilustración 3 el área sin rellenar). Con todo esto, se tiene entonces que el flujo de savia para cada árbol será la suma de los flujos de savia de las dos secciones.

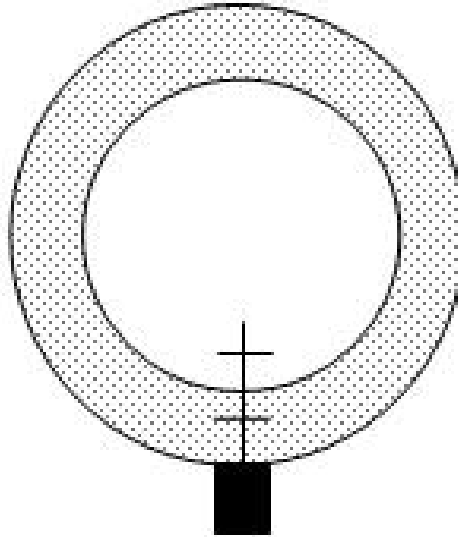


Ilustración 3.- Representación de la sección transversal de la inserción de un sensor de flujo de savia en un tronco. Se presentan cada par de termopares con líneas horizontales. A su vez, están representadas las áreas de cada par de termopares (área punteada para los externos, área vacía para los internos).

OBJETIVOS

Objetivo general

El presente trabajo pretende construir y evaluar un sistema de medición del flujo de savia económico basado en el sistema HRM, que permita la adquisición masiva de datos fiables y contrastables a un coste razonable así como contrastar su eficacia con la de equipos comerciales similares.

Objetivos específicos

Este objetivo se divide en los siguientes objetivos específicos:

-)] Construcción de sistemas HRM siguiendo las indicaciones de Tyler et al (2012)
-)] Análisis de los costes de producción del sistema construido.
-)] Comprobación de la calidad de las medidas de los diferentes juegos de sensores en laboratorio
-)] Instalación en parcela experimental de los sensores construidos.
-)] Testado de los sensores construidos mediante la comparación de los datos medidos con éstos con los datos arrojados por sensores HRM comerciales.

Para ello se construyeron cuatro juegos de sondas (2 termopares y un calentador por juego) y un sistema que nos permitiera verificar el funcionamiento de los equipos. Por otra parte, se eligió el sistema colector de datos con el software correspondiente.



MATERIALES Y MÉTODOS

Fabricación de sondas: Termopares tipo E y calentadores

Basándonos en el sistema descrito, se procedió a la construcción de cuatro juegos de termopares y calentador siguiendo las indicaciones descritas por Tyler et al (2012).



Ilustración 4.-Vista general del laboratorio

Los trabajos de laboratorio se realizaron en las dependencias del laboratorio de ecosistemas forestales de la Universidad Politécnica de Valencia (Ilustración 4), donde se disponía del equipamiento básico para la realización de las labores de montaje y comprobación.

Siguiendo las especificaciones técnicas y comerciales recogidas en el trabajo de Tyler, se adquirieron una serie de materiales y herramientas:

MATERIALES

-) Agujas hipodérmicas de 40x1,2 mm.
-) Cables de chromel morado de 0,13 mm (0,005").
-) Cables de constantan rojo de 0,13 mm (0,005").
-) Alambre 0.28 mm.
-) Cable extensión del sensor a datalogger (Morado chromel-constantan) 2x20mm
-) Cables de cobre de los usualmente utilizados para los cableados de altavoces
-) Micropipetas
-) Conectores chromel/constantan
-) Sistema CR1000 de Campbell Scientific®
-) Multiplexor AM16/32b de Campbell Scientific®
-) Tubo aislante termoretráctil de varios calibres y colores
-) Relé
-) Estaño
-) Decapante para soldaduras
-) Loctite®

HERRAMIENTAS:

-) Soldador de 25W
-) Soldador de 60W
-) Taladro Dremel®
-) Lupa
-) Cutter
-) Pistola de aire caliente de 2000W
-) Tester
-) Pelacables

El proceso de construcción de los termopares fue el siguiente:

-) Se cortan 25 cm de cable de constantan y otros 25 cm de chromel de diámetro 0.13mm.
-) Se pelan el constantan y el chromel 2.3 mm por un extremo de cada cable.
-) Se sueldan los extremos pelados de los cables de chromel y de constantan (Ilustración 5).
-) Se introducen la zona pelada y soldada (2.3 mm) dentro de una micropipeta de 4 cm.
-) Se introduce la micropipeta en la aguja hipodérmica.
-) Se sellan ambos extremos con pegamento Loctite[®]
-) Se unen los extremos libres con otros cables del mismo tipo pero mayor sección.
-) Se aísla cada una de las uniones con tubos termoretráctiles de calibre adecuado
-) Se aísla ambos cables con un termoretráctil de calibre adecuado.
-) Se une y aísla el extremo de la aguja hipodérmica con otro termoretráctil que abrace todo el conjunto.

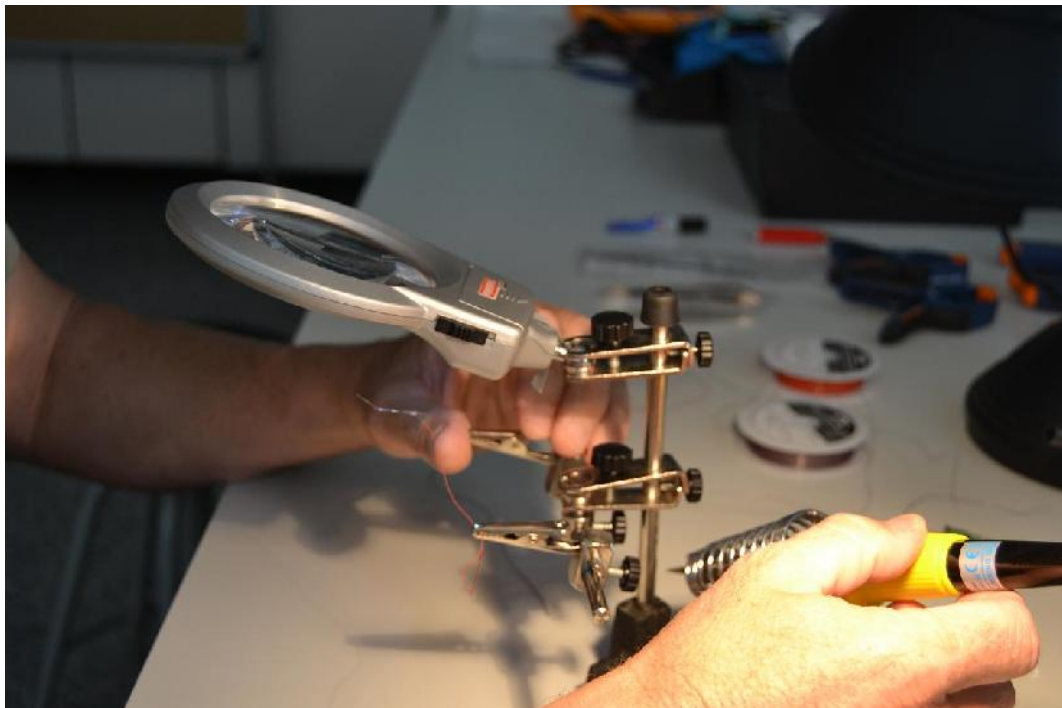


Ilustración 5.- Montaje de los termopares. Trabajos de soldadura.

El objetivo de utilizar varias capas de termoretráctil, es el de dotar de mayor fuerza estructural al conjunto. Utilizamos tubo termoretráctil negro o azul para diferenciarlos de los calentadores (rojo).

El proceso de construcción de los calentadores fue el siguiente:

-) Se cortan 25 cm de cable de chromel de diámetro 0.13mm.
-) Se elimina el aislante de los últimos 5mm de cada extremo del cable.
-) Utilizando el alambre rígido de 0.28 mm y 4cm de longitud como guía, se enrolla el cable en espiral sobre el mismo, soldando uno de los extremos sobre el alambre y dejando el otro extremo libre.
-) Se introduce en cable enrollado en la aguja hipodérmica haciendo coincidir el final con el extremo de la aguja y dejando en la zona con plástico los extremos del cable donde se conectarán con los de cobre.
-) Se une cada uno de los extremos del cable de chromel con el de cobre enrollando uno sobre el otro.
-) Se sueldan con estaño
-) Se sellan ambos extremos con pegamento Loctite©
-) Se aísla cada una de las uniones con tubos termoretráctiles de calibre adecuado
-) Se aísla ambos cables con un termoretráctil de calibre adecuado.
-) Se une y aísla el extremo de la aguja hipodérmica con otro termoretráctil que abrace todo el conjunto.

El objeto de utilizar varias capas de termoretráctil, es para dotar de mayor fuerza estructural al conjunto. Para los calentadores utilizamos tubo termoretráctil rojo para diferenciarlos de los termopares (azul o negro).

Se realizan 4 juegos completos (ocho termopares y cuatro calentadores).

Sistema de calibración

Uno de los objetivos planteados inicialmente en este trabajo, fue el de construir un sistema que permitiese calibrar los diferentes juegos de termopares construidos a fin de conocer la exactitud y precisión de los mismos. Para ello se construyó un sistema consistente en una botella de Mariotte que nos proporcionaba un flujo de agua a velocidad constante que pasaba por un medio homogéneo en el que se insertaban las sondas.

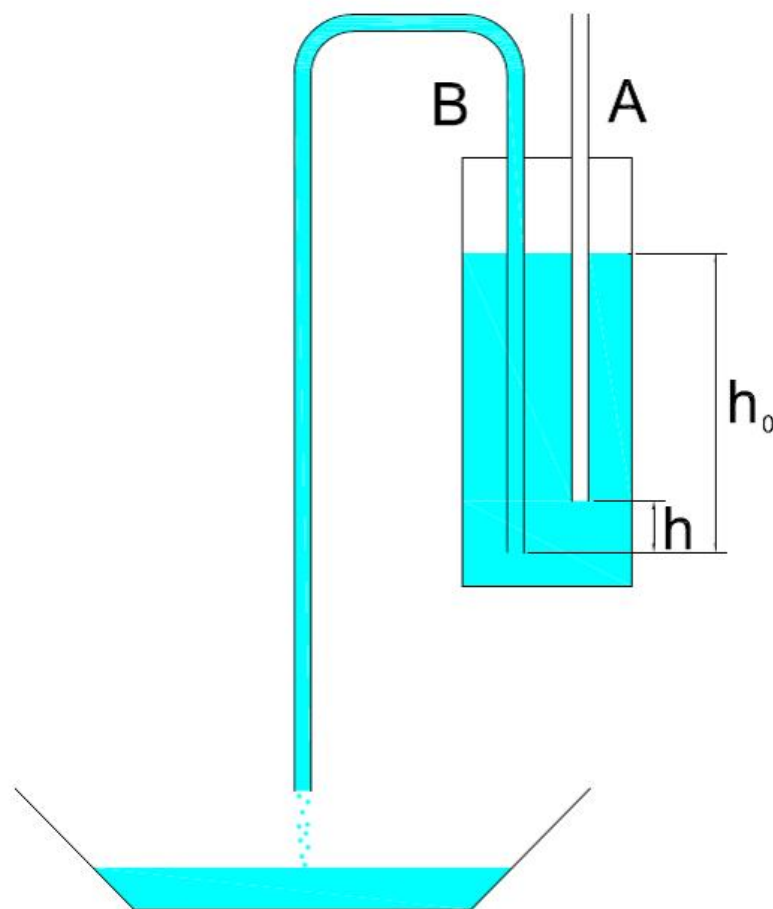


Ilustración 6.- Esquema de funcionamiento de la botella de Mariotte

La botella de Mariotte (Figura 6) Consiste en un frasco lleno de fluido hasta una altura h_0 , que está cerrado por un tapón atravesado por un tubo (A) cuyo extremo inferior está sumergido en el líquido. El fluido sale del frasco por otro tubo (B) cuya base se encuentra

por debajo de la del tubo A a una distancia h , y con el otro extremo situado igualmente por debajo de la base del tubo A. En el extremo inferior del tubo A, la presión es la atmosférica ya que está entrando aire por el mismo a medida que sale el líquido por el tubo B.

La velocidad de salida del fluido no corresponderá a la altura h_0 desde el orificio a la superficie libre de fluido en el frasco, sino a la altura h o distancia entre el extremo inferior del tubo A y el extremo inferior del tubo B.

Dado que h permanece constante en tanto que el nivel de líquido esté por encima del extremo inferior del tubo, la velocidad del fluido se mantendrá constante. Cuando la altura de fluido en el frasco h_0 es menor que h , la velocidad de salida del fluido deja de ser constante

La velocidad de salida puede modificarse aumentando o disminuyendo el valor de h .

El sistema desarrollado se compone de un matraz, colocado sobre un elevador que permite regular el valor de h y cerrado herméticamente con un tapón atravesado por dos tubos: uno en contacto con la atmosfera y otro que introducimos en un tubo donde se mantiene una columna constante de agua sobre un medio poroso en el que se inserta el sistema de medición de flujo. De esta forma se pretende que la velocidad del fluido que atraviesa este medio sea constante. Dado que se conoce la sección del tubo y el volumen de líquido que lo atraviesa en un tiempo determinado (flujo volumétrico), podemos calcular la velocidad del flujo (formula 1).

$$Q = A \cdot v \cdot \cos\theta$$

En esta caso, dado que el flujo es perpendicular al área A , es decir, $\theta = 0$, la tasa del flujo volumétrico es (formula 2):

$$Q = A \cdot v$$

Donde v es la velocidad, Q el flujo volumétrico y A la sección.



Ilustración 7.- Botella de Mariotte utilizada en la calibración de los equipos. En el tubo de metacrilato transparente se aprecia un sustrato formado por serrín de haya confinado entre corcho verde.

Se colocaron los cuatro juegos de termopares y calentadores en la misma sección separados por un ángulo de 90° , de tal forma que midiesen la velocidad del flujo a su paso por esa sección en concreto, a fin de comprobar las velocidades medidas por cada uno de ellos y verificar de este modo las diferencias entre cada juego y poder estudiar la dispersión de los datos si los hubiera.

Del mismo modo, se probaron diferentes sustratos para estudiar las diferencias de velocidad en función de los mismos y si influía en la dispersión de datos entre los diferentes juegos de sondas. Los sustratos utilizados fueron:

-) Polvo de serrín de madera de haya
-) Café molido
-) Arenas de diversos grosores
-) Corcho verde
-) Combinaciones de los anteriores

Del mismo modo se realizaron medidas con estratos saturados con velocidades conocidas.

Los datos recogidos durante las pruebas fueron:

-) Fecha
-) Hora
-) N° de orden
-) Voltaje
-) Temperatura en el colector (ambiente)
-) Temperatura máxima del intervalo para cada uno de los termopares (8).
-) Temperatura mínima del intervalo para cada uno de los termopares (8)
-) Temperatura media del intervalo para cada uno de los termopares (8)

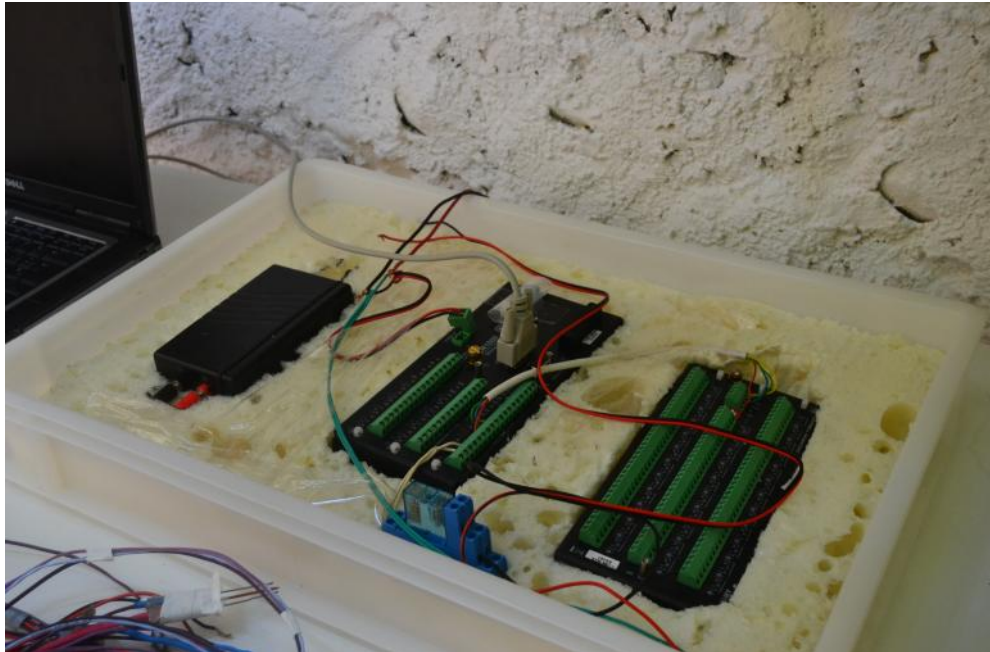


Ilustración 9.- Montaje del Datalogger, Multiplexor, fuente de alimentación y relé en una caja acolchada para su transporte a campo.

La ejecución de los taladros donde se insertarán las diferentes sondas, se realizan utilizando una plantilla metálica dotada de una serie de orificios a distancias fijas que permiten realizar los taladros a las distancias precisas y con una aceptable geometría (Ilustración 10).



Ilustración 10.- Ejecución de los taladros a través de la placa guía.

Para las mediciones se utilizan las parcelas de experimentación del grupo de investigación Re-ForeST del IIAMA de la Universidad Politécnica de Valencia (Ilustración 11).



Ilustración 11.- Cartel del Grupo de Investigación instalado en la puerta de acceso a la parcela de experimentación.

La parcela se encuentra situada en el Monte Público de La Hunde y Palomeras ($39^{\circ}50'30''$ N, $1^{\circ}12'30''$ O), en el Suroeste de la provincia de Valencia, a 950 m sobre el nivel del mar. Presenta orientación NO y una pendiente del 30%.

El clima es Mediterráneo, con una precipitación media anual de 466 mm y una temperatura media anual de 13.7°C .

Situada sobre suelos calizos con abundantes arcillas de descalcificación y abundancia de materia orgánica procedente de la descomposición del propio bosque, presenta un elevado contenido en carbonato (26-38 %; pH 7.7-8.2). Con una profundidad media aproximada de 50-60 cm y una textura areno-arcillosa proporciona un sustrato adecuado al estudio, ya que la capacidad de retención de agua es elevada a pesar del escaso desarrollo en profundidad propio de los montes de la zona.



Ilustración 12.- Vista general de la parcela.

La parcela experimental (Ilustración 12) forman parte de un típico carrascal Mediterráneo, de unos 60 años de edad aproximadamente, dominado por *Quercus ilex ssp rotundifolia*, en el que también encontramos algunos pies de *Quercus faginea* y *Pinus halepensis*. La densidad arbórea es de 861 árboles ha⁻¹ y su estrato arbustivo algo escaso, en el que predominan el *Juniperus phoenicea* y el *Juniperus oxycedrus*.

Se seleccionaron dos árboles en los que se instalaron dos juegos (uno de fabricación propia y otro comercial) en cada uno de ellos. La instalación se alimenta con una batería que a su vez se recarga a través de placas solares con lo que se pretende conseguir la autonomía energética del sistema. Los juegos se colocan en la parte norte del árbol a fin de minimizar los efectos que la exposición directa al sol pudiese tener sobre los termopares. Además se protege el conjunto con un parasol con la misma finalidad.

La información generada por los equipos de ICT se recoge en un datalogger externo (Ilustración 13) conectado con sus sensores (Ilustración 14)



Ilustración 13.- Datalogger de ICT



Ilustración 14.- Sensor de ICT

Se recogieron los siguientes valores para cada registro:

-) Fecha
-) Hora
-) Nº de Orden
-) Nivel de Batería
-) Temperatura en el colector de datos (temperatura ambiente)
-) Temperatura en cada termopar

Análisis de datos

El análisis de los datos se realizó con diversas aplicaciones informáticas, fundamentalmente Excel, para la generación de gráficos a partir de los datos recolectados y cálculos y StatGrafics y SPSS para la realización de los análisis estadísticos.

Para comprobar la similitud de respuesta de los diferentes grupos de sensores entre sí, se utilizó el análisis de covarianza (ANCOVA) tomando el déficit de presión de vapor (DPV) como covariable. Las pruebas Post-hoc sobre los factores ajustados por la covariable, se realizó mediante la comparación por pares de las medias marginales estimadas con los P-niveles ajustados por Bonferroni. En todos los análisis, se examinan la normalidad y homogeneidad de la varianza (Test de Levene).

En el ANCOVA, se comparó el postulado de homogeneidad en la pendiente de regresión entre los equipos mediante la observación de la interacción entre la DPV y los grupos HRM

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Fabricación de sondas: Termopares tipo E y calentadores

La construcción de los juegos de termopares y calentadores, una vez definida la sistemática constructiva, ha resultado sencilla y con resultados plenamente satisfactorios.

El tiempo empleado en la construcción de cada elemento ha rondado los 30 minutos de media, disminuyendo el tiempo empleado conforme iba aumentando la práctica. Las herramientas y materiales utilizados han resultado fáciles de adquirir y a precios asequibles, por lo que se puede concluir que los resultados de la fase constructiva avalan el planteamiento del trabajo.

El coste de cada uno de los juegos se ha estimado en 5.5 € según el desglose presentado en el tabla nº 1

ELEMENTO	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (€)	TOTAL (€)
Agujas hipodérmicas (ud)	3	0.02	0.06
Micropipetas (ud)	2	0.15	0.30
Alambre (m)	2	0.07	0.13
Constantan TFCC-005-100v (m)	0.5	0.77	0.38
Cromel TFCH-005-100 (m)	0.25	0.76	0.19
Cromel TFCH-020-1000 (m)	2	0.63	1.25
Constantan TFCC-020-1000 (m)	2	0.63	1.25
Cable Extensión EXPP-E-20-1000 (m)	2	0.90	1.79
SUMA			5.37
Material auxiliar (2.5%)			0.13
TOTAL			5.50

Tabla 1.- Coste de los materiales utilizados en la construcción de sistema HRM

A este coste habría que sumarle el datalogger y el multiplexor de Campbell Scientific[®] que suponen otros 2120 €. Naturalmente, el coste unitario dependerá del número de sensores que conectemos al mismo. Si utilizamos la capacidad máxima del multiplexor, serían 16, lo que supondría 132.5 €, que sumados a los 5.5 € del juego de sondas, supone un coste total de 138 € por cada HRM

El coste de los sistemas ICT ronda los 800 € por juego de sensores a lo que habría que sumarles el coste del datalogger, unos 2200 € (Del Campo, comunicación personal). Si bien es cierto que el nº de sensores que se pueden conectar al datalogger es muy superior, queda patente que el coste unitario es notablemente mas económico en los equipos UPV.

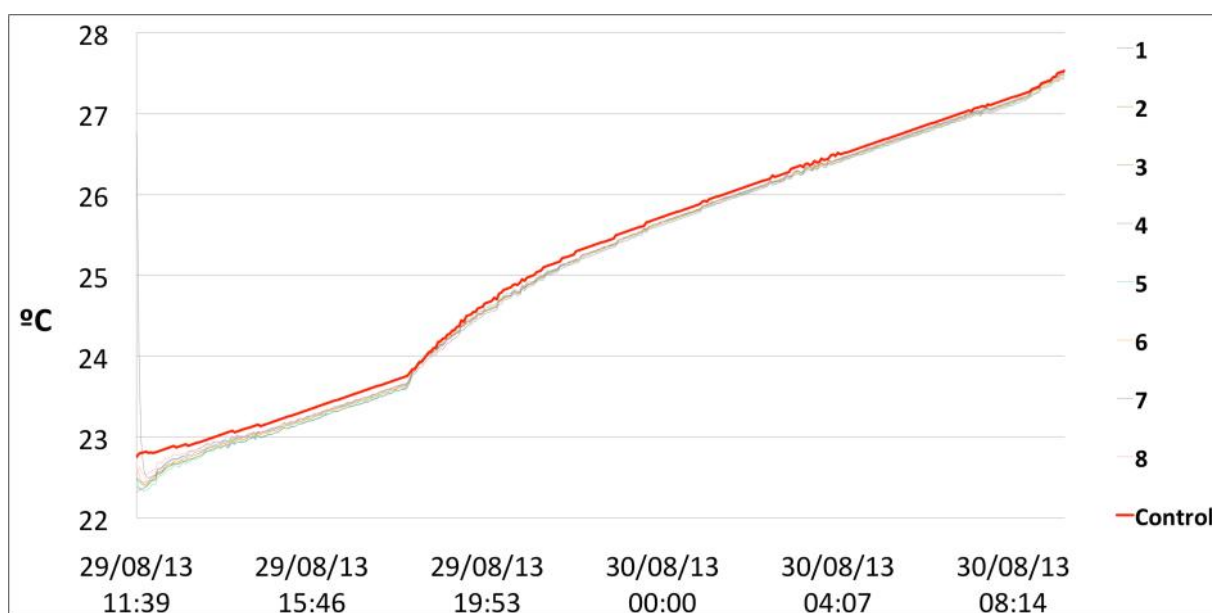


Gráfico 1.- Temperaturas medidas por los termopares fabricados

Para comprobar la sensibilidad y fiabilidad de los termopares fabricados, se realizaron una serie de mediciones de temperatura para comprobar el funcionamiento de los mismos dentro del rango estudiado (Gráfico 1). Se hizo variar la temperatura en la sala con ayuda de un calefactor durante un periodo aproximado de 24 h. Las temperaturas registradas oscilaron entre los 22 y los 28 ° C aproximadamente y en este intervalo las diferencias observadas se mantuvieron estables en todos los casos.

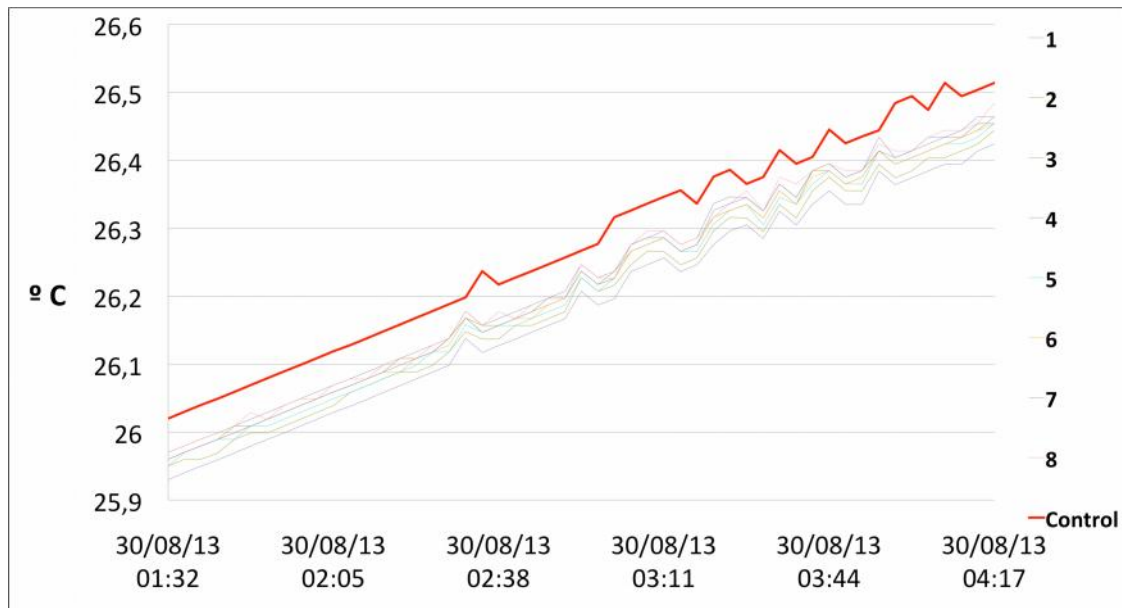


Gráfico 2.- Detalle de la evolución de la temperatura medida por los termopares fabricados

Se probaron los 8 termopares fabricados, sujetándolos mediante pinzas por la parte de plástico a un soporte, de tal forma que todos compartiesen el mismo ambiente. Por otra parte, se registro la temperatura recogida internamente por el datalogger (Control).

En el Gráfico 2, se observa que, si bien existen diferencias entre las temperaturas tomadas por los distintos sensores, esta se mantiene en un rango inferior a la decima de grado, manteniéndose las diferencias entre los distintos sensores, lo que se considera una sensibilidad suficiente y acorde con los objetivos buscados.

Del mismo modo, podemos observar una mayor inercia en el sensor del datalogger, que parece registrar los cambios de temperatura con cierto retraso con respecto a los termopares. Este extremo se puede explicar por la mayor masa del aparato con respecto a los termopares.

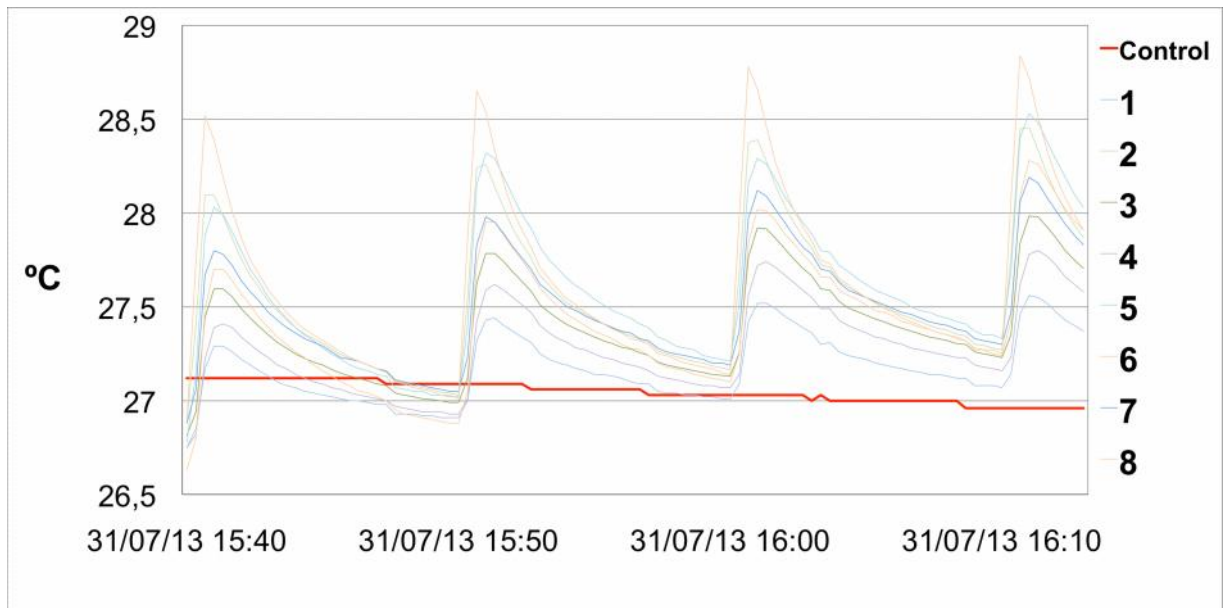


Gráfico 3.- Respuesta de los termopares fabricados frente a los impulsos de calor generados por los calentadores.

Por otra parte, se comprobó la respuesta a los impulsos de calor (Gráfico 3). Para ello se generó un impulso de calor durante 5 segundos cada 10 minutos, dejando que el sustrato se enfriara a temperatura ambiente (sin flujo de agua). Se pudo observar que la respuesta era correcta en todos los casos. La diferencia de los valores registrados pueden ser achacados a varios factores no contemplados en el experimento, fundamentalmente la geometría de los termopares respecto a los calentadores y la heterogeneidad del sustrato.

No obstante, dado que la velocidad se calculará a partir de las diferencias entre dos termopares del mismo juego, las diferencias apreciadas no influyen en el resultado, ya que estas se mantienen constantes.

La precisión observada (repetitividad del evento) arroja valores satisfactorios, aunque la exactitud (distancia a lo real) sea difícil de estimar por no conocer el valor real.

Sistema de calibración

Las mediciones realizadas con el sistema de calibración basado en la botella de Mariotte, sirvieron para comprobar el funcionamiento de los diferentes juegos HRM construidos, los tiempos óptimos de duración de los impulsos de calor y el tiempo que debe transcurrir entre impulsos.

Se probaron periodos entre impulsos entre 1 y 5 segundos de duración e intervalos entre impulsos entre 1 y 15 minutos. Los mejores resultados se obtuvieron con impulsos de 3 segundos cada 5 minutos (Gráfico 4), ya que era necesario producir calor suficiente para estimular los sensores de forma inequívoca y permitir el total enfriamiento entre impulsos. Las mediciones se realizaron cada 30 segundos, considerando que había suficiente información de la evolución de la temperatura sin generar exceso de información.

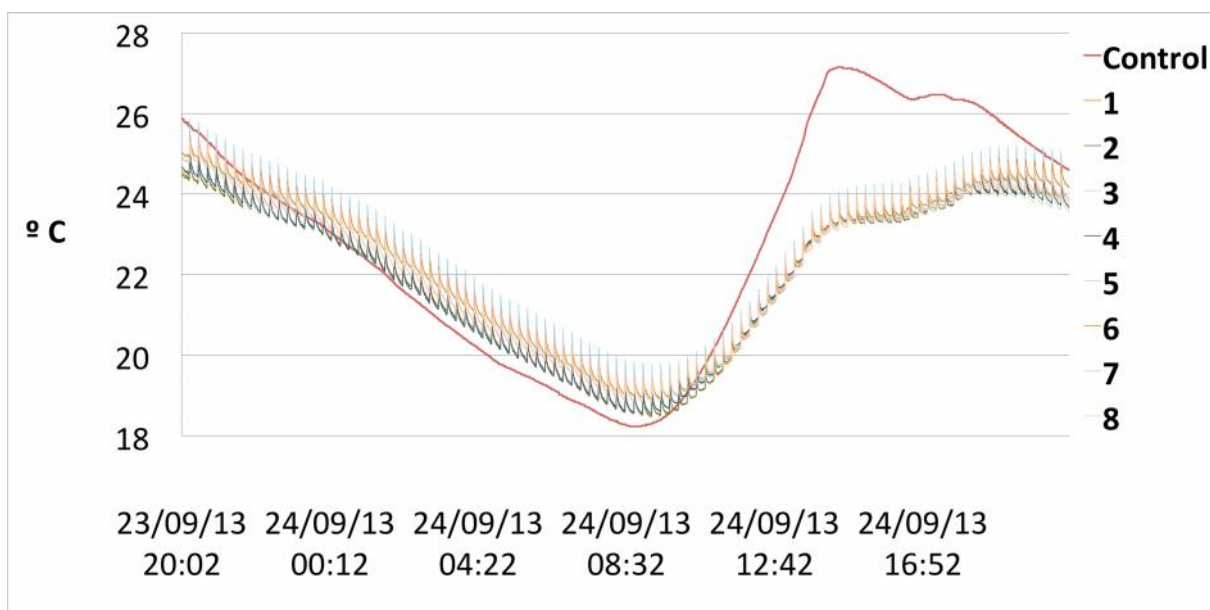


Gráfico 4.-Evolución de las temperaturas medidas por los diferentes sensores a lo largo de 24 horas con mediciones cada 30 segundos con pulsos de calor de 3 segundos cada 5 minutos

Analizando los datos se observó que si bien las mediciones de temperatura oscilaban de un juego a otro, (Gráfico 5), estas se mantenían en valores muy próximos entre los termopares de un mismo juego, lo que vendría a indicar que los impulsos de calor eran ligeramente diferentes, ya sea por la potencia de los mismos o por una colocación ligeramente distinta del calentador con respecto a sus termopares.

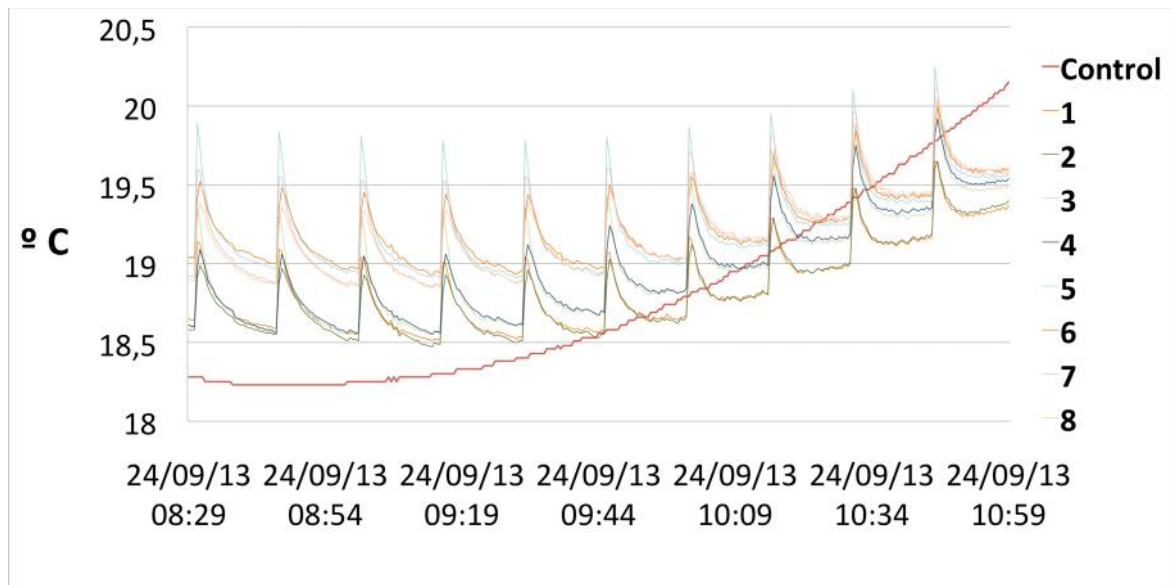


Gráfico 5.- Detalle de la variación de temperaturas medidas en el sistema de calibración

Los incrementos de temperatura (Gráfico 6) registrados entre los dos termopares de un mismo grupo resultaron ser proporcionales y estables a lo largo de las sucesivas medidas, aunque con importantes variaciones entre los distintos juegos.

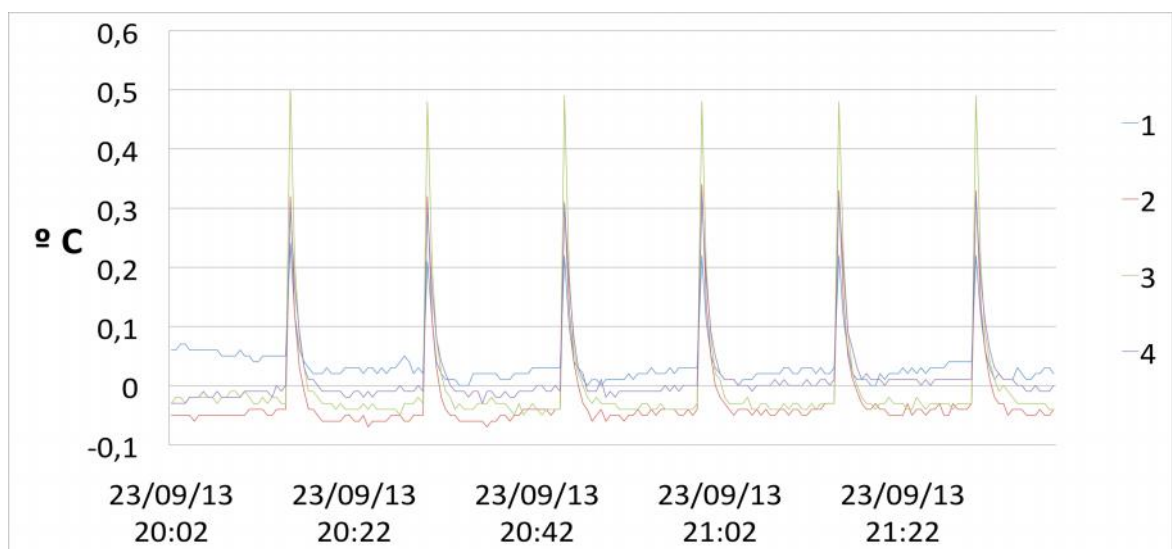


Gráfico 6.- Detalle de la diferencia de los incrementos de temperatura en cada uno de los juego de sensores

Esta situación se ha repetido con los diferentes sustratos empleados.

El análisis de los datos permitió ver que, siendo las temperaturas medidas similares par a par, no podía deberse a una diferente sensibilidad de cada juego, por lo que se concluyó que la diferencia de velocidades medidas debía achacarse a la aparición de múltiples canales de circulación del agua en el sustrato que impedían que se generase un flujo homogéneo cuya velocidad pudiese ser medida en cualquier punto del sustrato.

Se desestimó, por tanto, los datos obtenidos por este método pendientes de encontrar la manera de solucionar los problemas existentes.

Instalación en campo

Paralelamente a los trabajos de laboratorio, se instalaron dos juegos de termopares en dos ejemplares de *Pinus halepensis* de la parcela de experimentación que el grupo de investigación Re-ForeST del IIAMA de la Universidad Politécnica de Valencia tiene en el monte de la Hunde.

Junto a estos juegos, se instalaron otros dos del sistema comercial de ICT, para poder comparar los valores obtenidos. Identificamos los equipos de ICT como ICT1 e ICT2 y a los contruidos artesanalmente como UPV1 y UPV2.

La toma de datos se verifico entre los día 11 y 25 de noviembre de 2013 con registro horario del valor de velocidad. Se produjeron una serie de cortes de energía que tuvieron como consecuencia la pérdida parcial de datos. Estos cortes coincidieron con las horas de menor intensidad luminosa y durante la noche, por lo que se achacó a problemas con las baterías de acumulación de la energía obtenida por las placas solares, de tal forma que cuando estás no eran capaces de suministrar suficiente potencia al sistema, la toma de datos quedaba interrumpida.

Esta situación ha tenido como consecuencia la perdida de datos de los momentos de menor actividad fisiológica, por lo que se ha considerado que la misma no invalida los datos obtenidos.

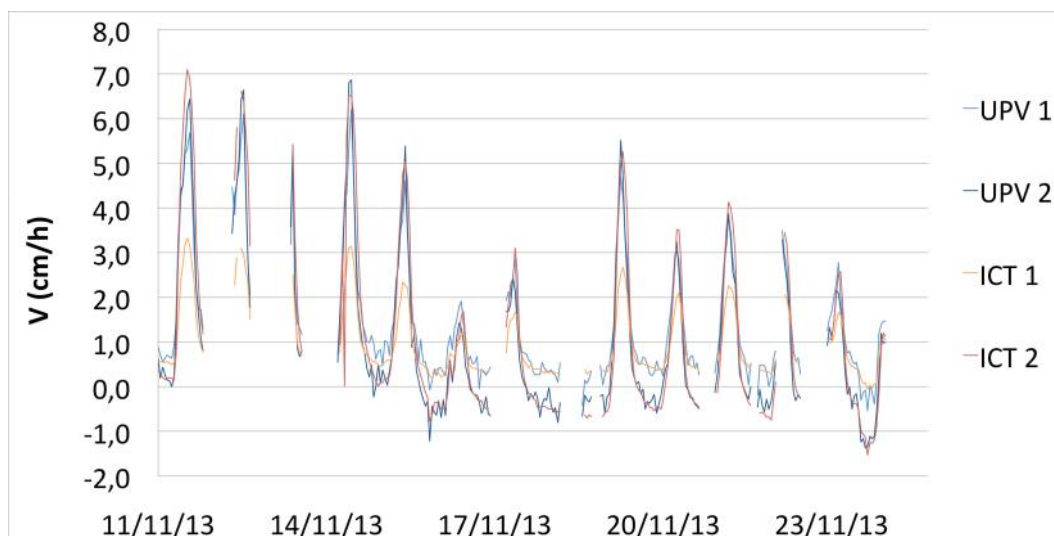


Gráfico 7.- Velocidades de flujo de savia obtenidos de los sensores colocados en el monte de La Hunde.

En el Gráfico 7, se pueden ver los valores obtenidos de velocidad de flujo de savia para los 4 juegos de sensores colocados. Se observan los citados cortes de energía que, como es lógico, afectan a todos los equipos por igual.

Para poder analizar mejor los resultados, se optó por eliminar estos cortes y presentar los valores continuos (Gráfico 8), ya que se pretende comparar la calidad de los datos entre los diferentes tipos de sensores y esa depende de las medidas simultáneas.

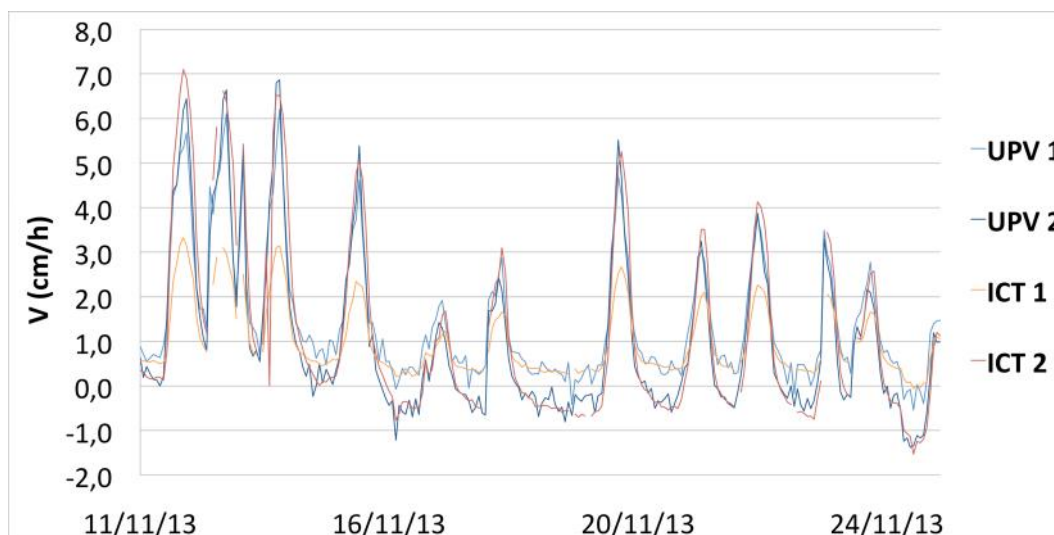


Gráfico 8.- Comparativa de los valores de velocidad de los diferentes grupos

En el gráfico 8 se puede observar que la respuesta de los 4 grupos es similar, aunque los valores no sean los mismos. Hay que reseñar que esta diferencia se da tanto en los grupos comerciales como en los realizados artesanalmente. De hecho, la diferencia entre los dos grupos de ICT son mayores entre sí que los presentados por los dos grupos artesanos.

Del mismo modo, analizando el gráfico, podemos presumir que en los equipos de ICT existe habilitado algún algoritmo de suavizado que contribuye a que la línea no presente los saltos que podemos observar en los grupos artesanos. En este sentido, se ha aplicado un algoritmo similar, obteniéndose los datos recogidos en el Gráfico 9. No obstante, y en aras a una mejor comparativa entre los dos sistemas, utilizaremos los datos brutos para el análisis numérico de los resultados.

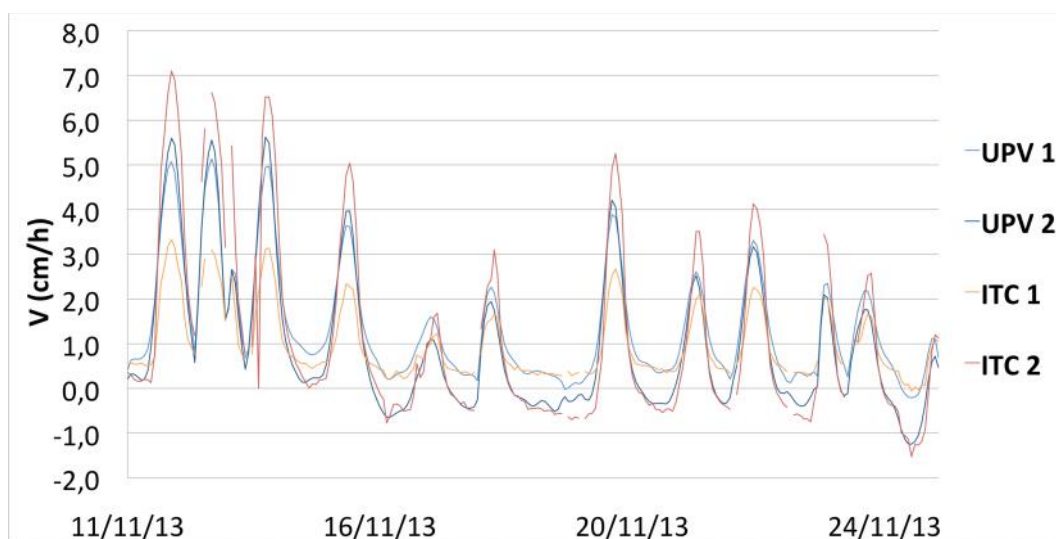


Gráfico 9.- Velocidades de flujo de savia de los diferentes equipos una vez se ha aplicado el algoritmo de suavizado a los fabricados en la UPV. El algoritmo utilizado ha sido $a_n = (a_n + ((a_{n-1} + a_{n+1})/2))/2$ aplicado cuatro veces consecutivas.

Análisis de los datos

Con vistas a determinar la calidad del sistema, se procedió al análisis de los datos obtenidos y a su ulterior comparación con el sistema comercial de ICT. En primer lugar se midió la capacidad de los termopares para medir las variaciones de temperatura de manera independiente.

Estadísticos

	UPV 1	UPV 2	ICT 1	ICT 2
Recuento	232	232	232	232
Promedio	1.45	0.99	0.97	1.14
Desviación Estándar	1.40	1.78	0.78	2.01
Coefficiente de Variación (%)	96.74	178.38	80.69	176.69
Mínimo	-0.54	-1.04	-0.06	-1.53
Máximo	6.20	6.86	3.32	7.10
Rango	6.75	8.24	3.39	8.63
Sesgo Estandarizado	8.59	8.80	7.82	7.89
Curtosis Estandarizada	4.14	4.56	1.86	2.08

Tabla 2 .- Análisis numérico de las velocidades obtenidas por los diferentes equipos HRM

Si analizamos los datos obtenidos por cada uno de los grupos, y comparamos entre los del mismo tipo, observamos que el rango de los promedios es muy superior en los grupos artesanos (0.45 vs 0.18), lo que indicaría que los grupos de ICT están más cerca de la media y por tanto, sería más exactos, sin embargo, el rango de la desviación estándar es muy superior en los equipos de ICT (0.38 vs 1.23) lo que nos indica una mayor imprecisión en estos equipos. Esta relativa incongruencia de los datos entre exactitud y precisión, podría ser debido al efecto de suavizado del algoritmo anteriormente mencionado. Otro dato que viene a corroborar lo anterior es la diferencia observada entre los máximos y mínimos alcanzados por cada equipo, siendo de 1.49 para los grupos UPV y de 5.25 para los de ICT, es decir, hay diferencias mucho mayores entre los equipos comerciales que entre los artesanos.

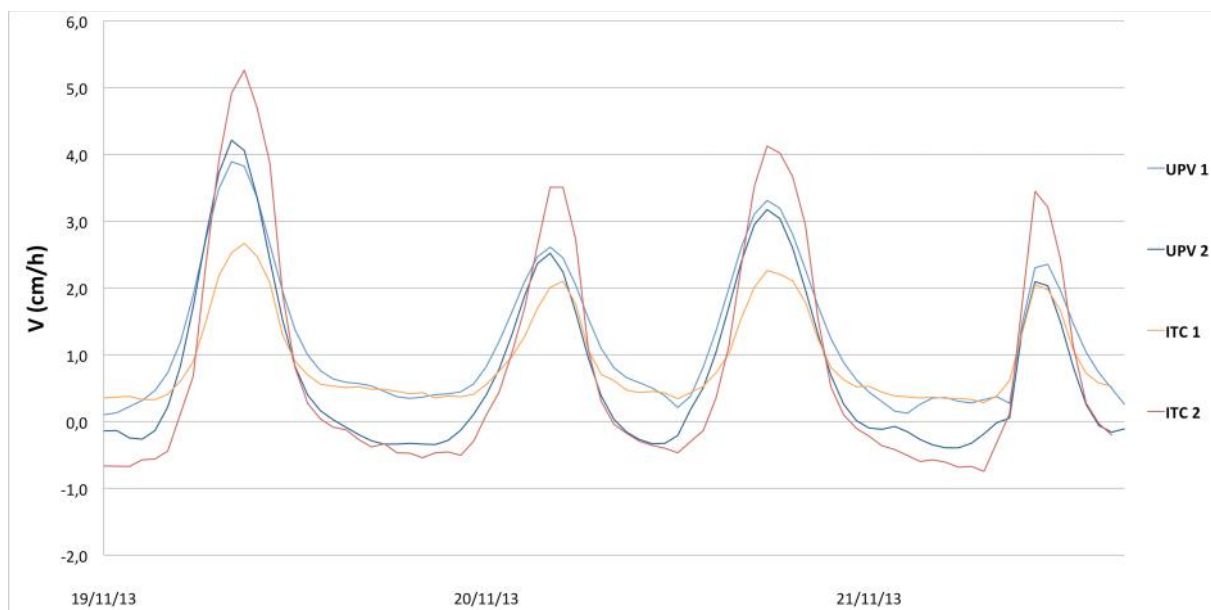


Gráfico 10.- Detalle del gráfico anterior (9). Se puede observar la menor oscilación de los datos de velocidad y la mayor variabilidad de los mismos en el equipo de ICT..

Obsérvese (Gráfico 10) que los valores máximos de ICT 2 están por encima de los de ICT 1 mientras que los mínimos están por debajo, lo que tiene como consecuencia que las líneas se entrecrucen. Esto no ocurre con los grupos UPV, que si bien aumentan o disminuyen la distancia, rara vez se entrecruzan y cuando esto ocurre las diferencias son mínimas.

El sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada no son significativos en este análisis, ya que no estamos realizando una comprobación entre los equipo (4) sino los valores medidos por cada uno de ellos a lo largo de varios días (232 valores). En cualquier caso, el sesgo presenta valores similares en todos los grupos, si bien se puede observar unos valores ligeramente superiores en los equipos UPV. No obstante si existe un suavizado de los datos, esto sería de esperar, ya que reduciría los valores extremos. En cuanto al curtosis, los valores alcanzados por los equipos UPV son mucho más elevados que los obtenidos por los de ICT. Esto nos indica que la curva es más elevada en los equipos artesanos, mientras que los de ICT se acercan más a una distribución normal. Este extremo puede ser igualmente explicado por la existencia del citado algoritmo de suavizado.

Para comprobar este extremo hemos aplicado cuatro veces consecutivas un algoritmo de suavizado extremadamente simple ($a_n = (a_n + ((a_{n-1} + a_{n+1})/2))/2$) a los datos obtenidos por

nuestros sensores obteniendo gráficas muy similares en cuanto a la suavidad a los presentados por los equipos comerciales (Gráficos 9,11 y 12).

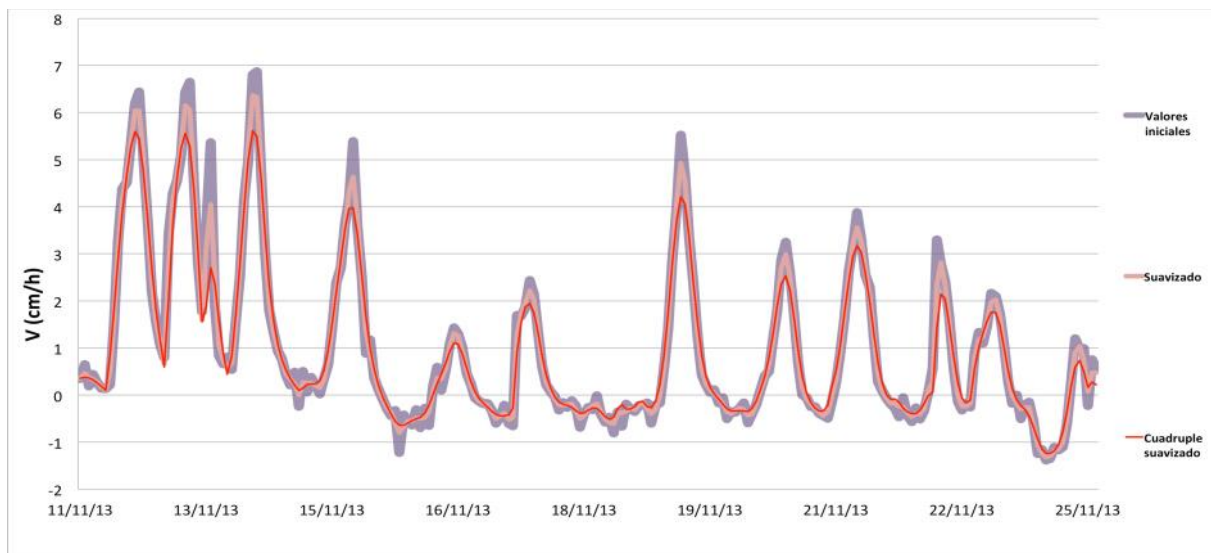


Gráfico 11.- Valores obtenidos aplicando el algoritmo de suavizado a los datos obtenidos por nuestro sistema. Se puede observar que desaparecen los saltos obteniéndose unos valores aparentemente menos erráticos en la línea de los obtenidos por el sistema de ICT

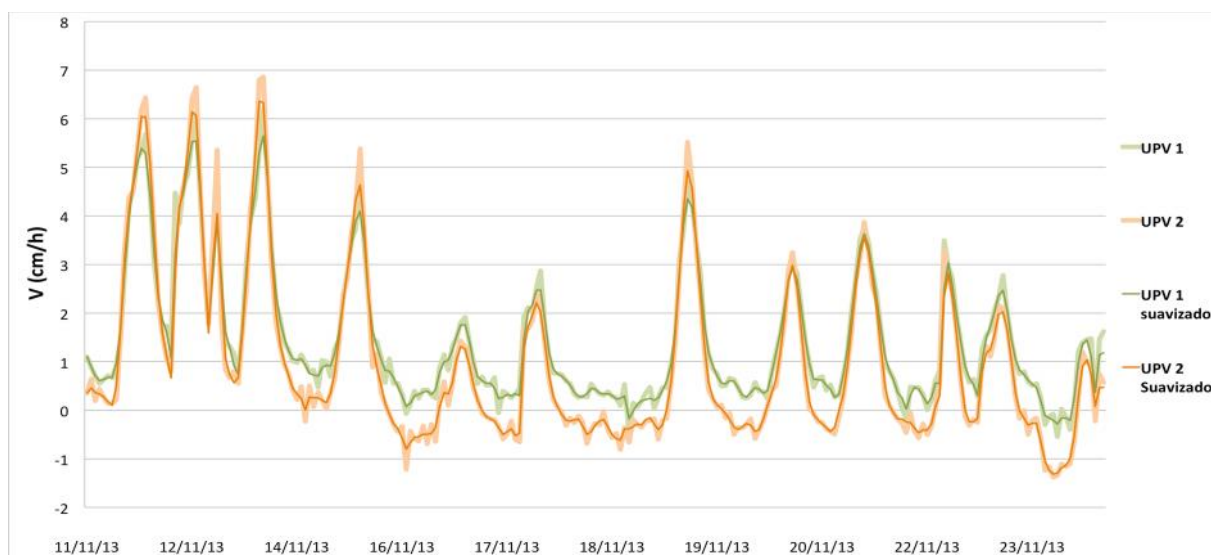


Gráfico 12.- Comparativa entre los valores brutos y los suavizados (una sola aplicación del algoritmo citado) en los sensores UPV

Por otra parte, se analizaron los datos climáticos de Humedad Relativa y Temperatura (Tabla 3) y la correlación existente entre los mismos y cada uno de los grupos HRM.

Fecha	Temp (°C)			HR (%)		
	Promedio	Máximas	Mínimas	Promedio	Máximas	Mínimas
11/11/13	10.07	15.31	5.37	71.03%	84.77%	56.14%
12/11/13	8.01	17.15	3.01	80.14%	95.29%	47.68%
13/11/13	9.35	14.43	4.91	87.56%	95.76%	70.62%
14/11/13	7.78	13.35	1.89	81.39%	96.33%	56.33%
15/11/13	2.49	7.13	-4.09	67.01%	81.06%	39.38%
16/11/13	-0.61	4.79	-4.83	85.36%	93.39%	72.92%
17/11/13	0.77	6.45	-2.75	87.24%	94.11%	70.33%
18/11/13	1.13	3.85	-0.69	94.68%	96.01%	92.82%
19/11/13	4.80	9.43	1.67	86.22%	95.90%	69.87%
20/11/13	1.51	5.63	-1.25	74.71%	88.51%	54.48%
21/11/13	1.96	5.95	-1.73	72.00%	83.07%	57.08%
22/11/13	1.57	6.41	-1.03	79.03%	93.27%	57.15%
23/11/13	0.92	6.89	-2.93	70.11%	85.38%	47.94%
24/11/13	-0.12	7.01	-4.53	75.11%	86.72%	53.97%
25/11/13	-0.47	7.93	-5.01	77.20%	92.59%	46.10%

Tabla 3.- Datos climáticos recogidos en la zona durante los días de estudio.

En los gráficos 13, 14 y 15 se puede observar la existencia de esa correlación en todos los equipos, tal como era de esperar, aunque una vez más se comprueba que la respuesta de los grupos UPV es más homogénea que los ICT: La sensibilidad ante los cambios de temperatura es patente en ambos grupos, pero las velocidades de los UPV están más cercanas entre sí y siempre a medio camino entre los valores de ICT.

Hay que reseñar que, debido a los cortes energéticos producidos, las datos de velocidades mínimas podrían no corresponder a los mínimos reales, aunque dado que la velocidad mínima es 0 en todos los casos (ya que no se esperan flujos negativos) , se consideran válidos los datos obtenidos.

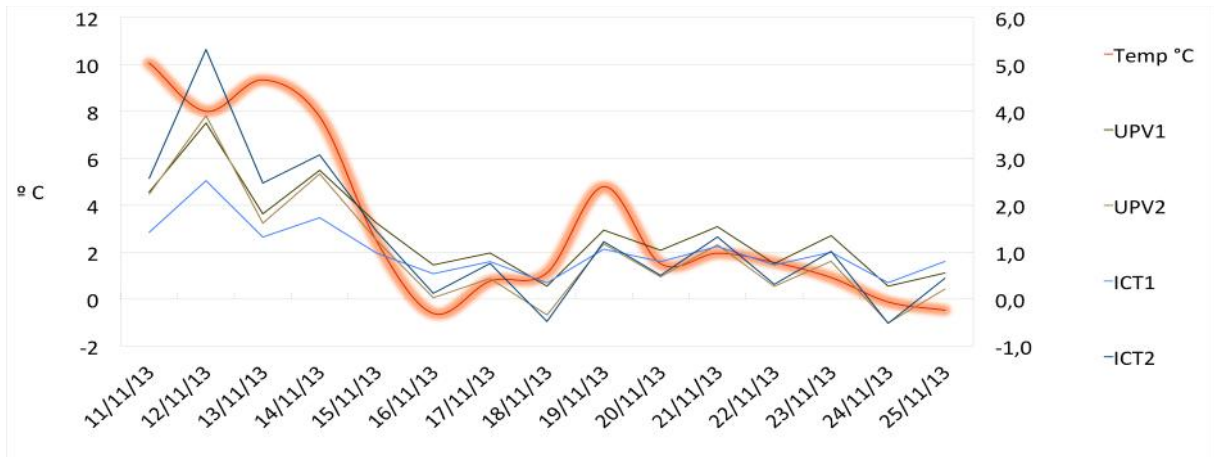


Gráfico 13.- Medias diarias de velocidades y temperatura

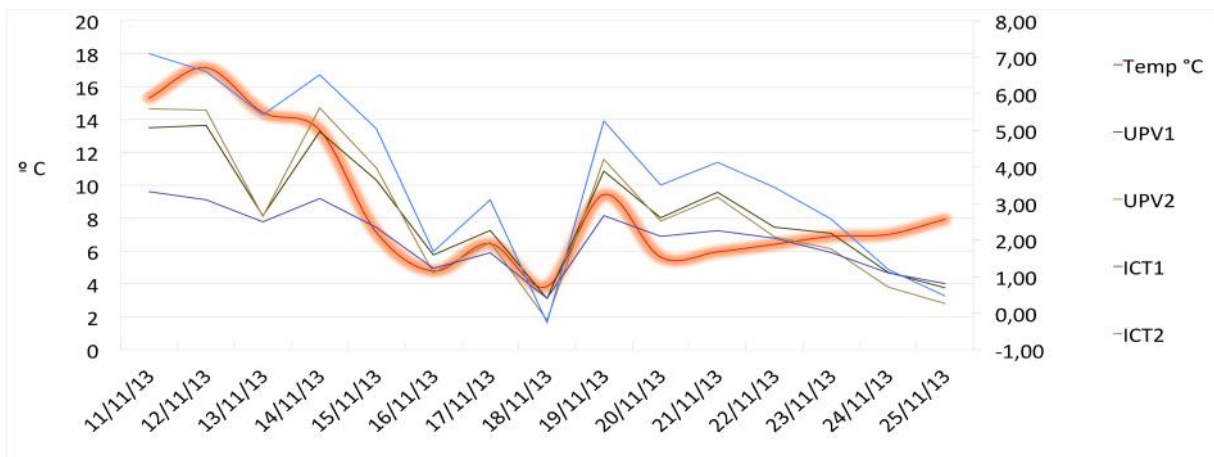


Gráfico 14.- Máximas diarias de velocidades y temperatura

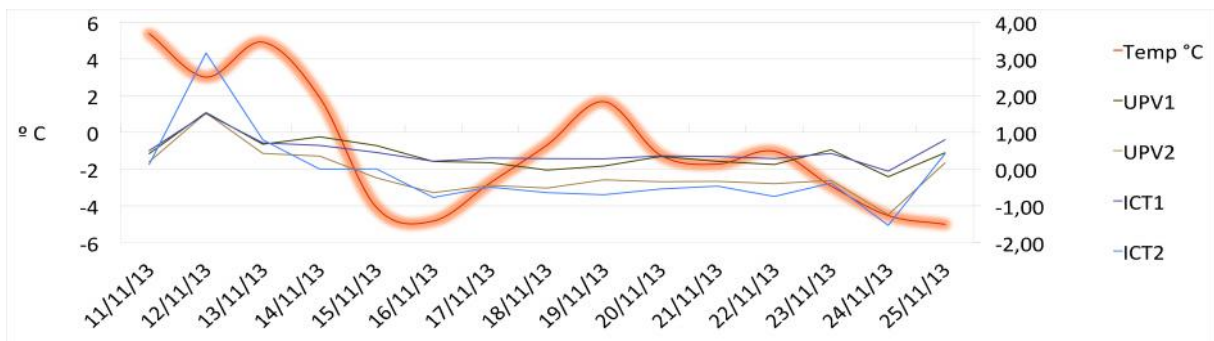


Gráfico 15.- Mínimas diarias de velocidades y temperatura

Dado que la transpiración es función no solo de la temperatura, sino también de la humedad relativa, se ha utilizado el Déficit de Presión de Vapor (DPV) para una mejor comprobación de la respuesta de los diferentes grupos de sensores a las condiciones ambientales. En el gráfico 16 se observa claramente la relación existente.

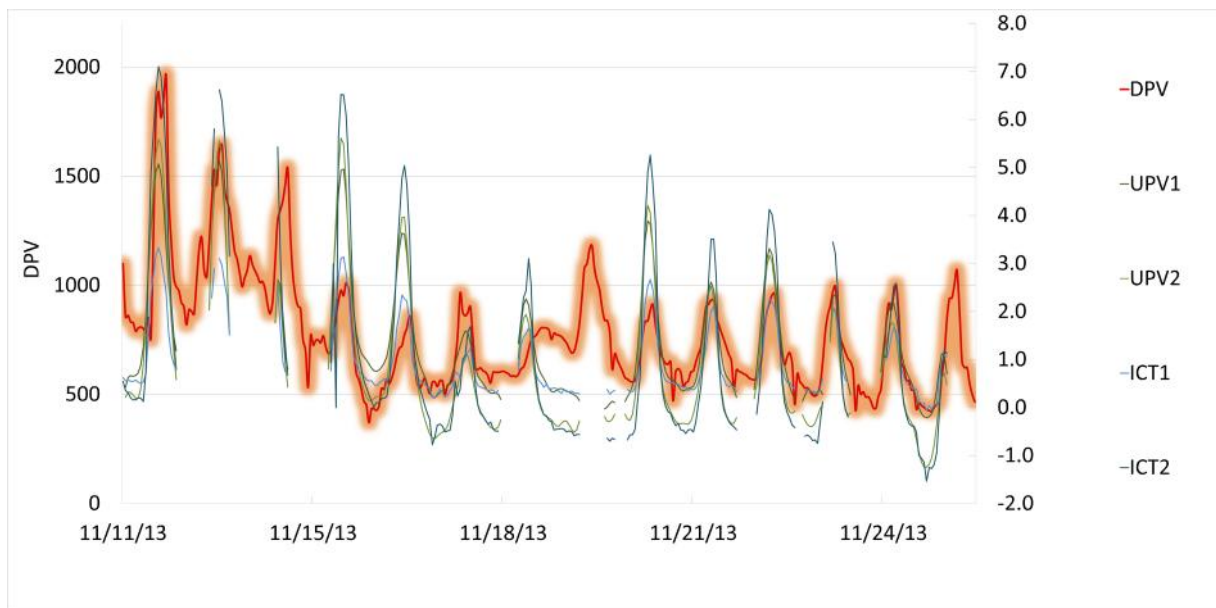


Gráfico 16.- Valores de velocidad (vs) y DPV

El Déficit de Presión de Vapor (e) se calcula a partir de la temperatura (T) y la humedad relativa (Rh), ambos valores obtenidos con una estación meteorológica situada en la zona por el equipo ReForeST.

Calculamos el valor de la presión de vapor de saturación (e_s) a partir de la temperatura

$$e_s = 611 \exp \frac{17.27T}{237.3 + T}$$

Conocida la Humedad relativa Rh , y despejando en la fórmula

$$Rh = \frac{e}{e_s}$$

Obtenemos los valores de DPV (e)



Gráfico 17.- Medias diarias de Vs y DPV



Gráfico 18.- Máximas diarias de Vs y DPV

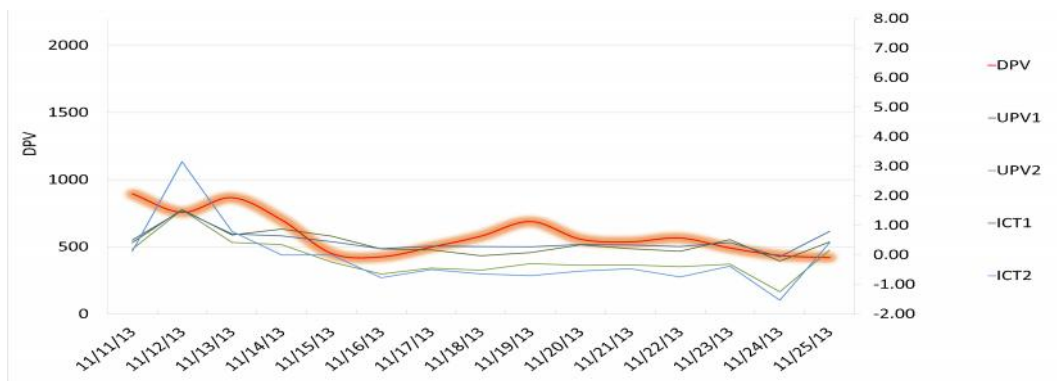


Gráfico 19.- Mínimas diarias de Vs y DPV

En los gráficos 17, 18 y 19 se recogen, respectivamente, la relación con las medias, máxima y mínimas diarias. Se puede observar que esta relación no esta tan marcada y que, en cualquier caso, está más relacionado con los valores extremos (máximas y mínimas) que con las medias.

Dada esta circunstancia, se optó por realizar el ANCOVA, con los valores medios de velocidad (V_s) registrados durante las horas de actividad vegetativa (de 8:00 a.m. a 7:00 p.m.), eliminando del análisis los registros correspondientes a las horas sin luz como Variable dependiente. La DPV, como covariable y TIPO de sensor como factor fijo.

Las condiciones para la realización del ANCOVA se han verificado aceptablemente (Levene es no significativo ($P\text{-value}=0,08$) y no hay variación en la pendiente de las rectas de regresión para cada nivel del factor (valores de cada tipo de sonda vs VPD))

Para el ANCOVA se utiliza como factor fijo la variable TIPO, que representa a cada uno de los grupos HRM (ICT1, ICT2, UPV1 y UPV2), siendo la velocidad (V_s) la variable dependiente. Se observa (Tabla 4) que la significación de TIPO obtiene valores significativos, indicando que las lecturas arrojadas por los distintos sensores difieren significativamente entre sí.

Variable dependiente: V_s					
Fuente	Suma de cuadrados tipo III	gl	Media cuadrática	F	Significación
Modelo corregido	83,739(b)	4	20,935	24,095	,000
Intersección	10,454	1	10,454	12,031	,001
DPV	73,561	1	73,561	84,665	,000
TIPO	8,443	3	2,814	3,239	,032
Error	35,623	41	,869		
Total	406,377	46			
Total corregida	119,362	45			

a Calculado con alfa = ,05
b R cuadrado = ,702 (R cuadrado corregida = ,672)

Tabla 4.- Pruebas de los efectos inter-sujetos

Sin embargo, las pruebas Post-hoc sobre los factores ajustados por la covariable, mediante la comparación por pares de las medias marginales estimadas con los P-niveles ajustados por Bonferroni, indicaron que las diferencias se producen únicamente entre los valores de los dos sensores comerciales, mientras que los sensores UPV no difirieron entre sí ni con los comerciales (tabla 5).

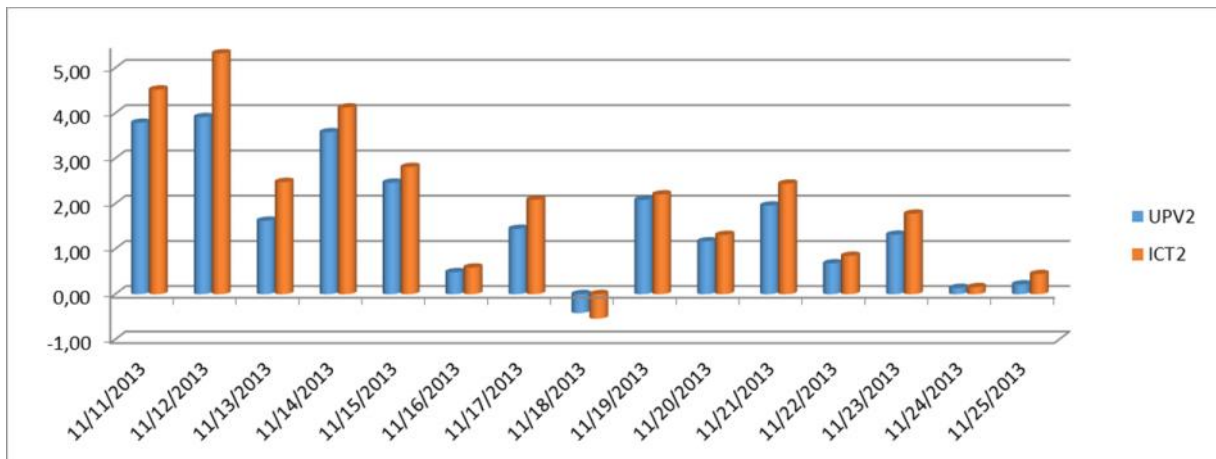
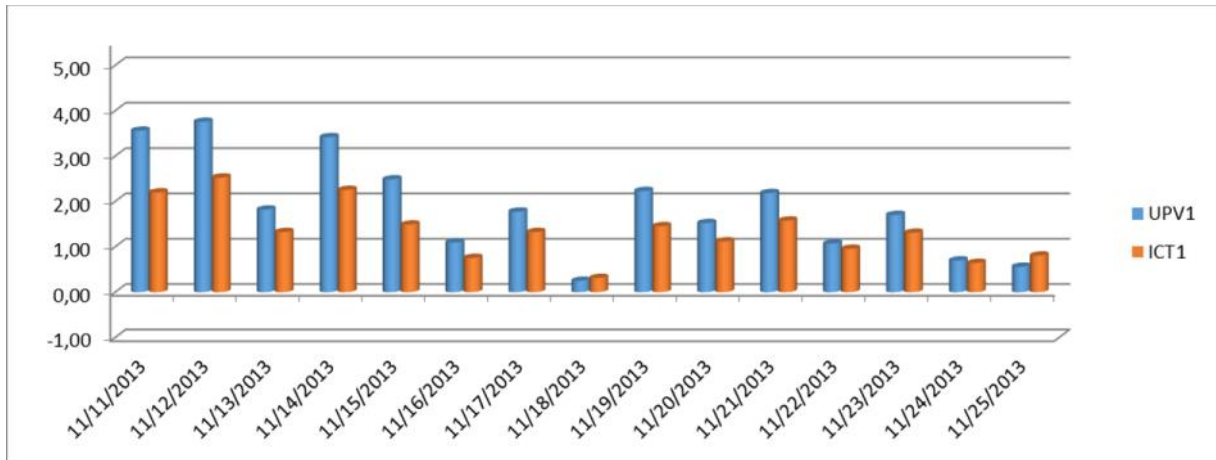
TIPO	Media	Error Tip.	Intervalo de confianza al 95%	
			Límite Inferior	Límite Superior
ICT1	1,802 (b)	0,281	1,234	2,37
ICT2	3,016 (a)	0,281	2,447	3,584
UPV1	2,603(ab)	0,269	2,059	3,147
UPV2	2,556(ab)	0,269	2,012	3,1

a las covariables que aparecen en el modelo se evalúan en los siguientes valores: DPV=1.106,12

Tabla 5.- Comparaciones por pares

Los grupos colocados en el mismo árbol (ICT1/UPV1 e ICT2/UPV2), no presentan diferencias significativas entre sí. Solo existen diferencias apreciables entre ICT1 e ICT2. Dado que están colocados en diferentes árboles, y dada la escasez de datos, no se pueden obtener conclusiones de ningún tipo, si bien este dato está en consonancia con la mayor dispersión observada entre los equipos comerciales.

En los gráficos siguientes (20 y 21) se puede observar las velocidades medias comparadas de los grupos colocados en cada uno de los árboles, donde se aprecia la relación descrita anteriormente.





CONCLUSIONES

La opción de la fabricación propia de sensores combinada con la adquisición de un sistema estándar programable para la recolección de datos (datalogger) se presenta como una opción económica y con resultados perfectamente comparables a los obtenidos por el sistema de ICT, notablemente más caro, dentro del carácter preliminar de este trabajo.

No obstante, ambos sistemas presentan amplia variabilidad en los datos que generan, por lo que se debe estudiar más detalladamente la precisión de un sistema que, dado su carácter invasivo, es intrínsecamente inexacto. La colocación de varios de estos sensores en un mismo árbol ha generado lecturas muy distintas en cada uno de ellos y sería importante definir que genera estas variaciones.

Precisamente, la posibilidad de fabricar numerosos sensores a bajo costes nos puede permitir recolectar datos suficientes para realizar análisis estadísticos más detallados que arrojen luz sobre este particular. La definición de algoritmos que mejoren la comprensión de los procesos internos de transpiración, al margen de las imperfecciones de los sistemas de medida, aparece como uno de los objetivos prioritarios ya que si bien es cierto que en la actualidad podemos conocer la tendencia general, es difícil poder cuantificar el volumen real de agua movilizada por la planta de manera suficientemente exacta.

Por otra parte, queda patente en el estudio realizado que las características inherentes al sistema de medición, dificultan la obtención de datos fiables a nivel de individuo, ya que son numerosos los factores que influyen en la calidad de la toma de datos y sobre los que poco o nada podemos hacer. Sin embargo, este hecho no es óbice para reconocerle todo el valor estadístico que se puede derivar de los datos obtenidos. Con las pertinentes correcciones, se puede llegar a conocer el funcionamiento del agua verde en una masa forestal de forma más sencilla y económica que con otros métodos.



TRABAJOS FUTUROS

Los resultados obtenidos permiten acometer la construcción de este tipo de sensores con expectativas favorables. No obstante, somos conscientes de la relativa validez de los datos obtenidos debido a la escasa muestra utilizada en los análisis. El elevado precio de los sensores comerciales dificulta la realización de un estudio comparativo entre ambos sistemas, por lo que deberíamos plantearnos conocer los valores de precisión y exactitud de nuestros equipos y contrastar estos con los aportados por los fabricantes de ICT.

La precisión y exactitud de los termopares es sencilla de medir en condiciones de laboratorio y, de hecho, los valores obtenidos son plenamente satisfactorios aunque solo se hayan realizado con 8 unidades.

El problema surge al intentar comprobar la velocidad del flujo. Esta dificultad viene dada por una parte, por la dificultad de conseguir un flujo continuo y homogéneo en laboratorio, por lo que habría que retomar las pruebas realizadas con la botella de Mariotte e intentar obtener el citado flujo. Una de las opciones que se plantean es la de utilizar un medio natural más parecido a las condiciones reales (madera) como sustrato. En este sentido se ha estudiado la posibilidad de utilizar maderas de baja densidad con las fibras bien orientadas y generar succión como elemento regulador.

Por otra parte, las pruebas en campo son aún más complejas: Por un lado hay que tener en cuenta que cada individuo puede reaccionar de forma distinta ante un mismo valor de DPV, por lo que los valores de velocidad obtenidas en un árbol no tendrían que ser, a priori, iguales a las de otro árbol aunque sean de la misma especie, edad o porte, aunque es de esperar que sean más parecidas cuanto más lo sean los individuos y estaciones. Por otro lado, incluso las mediciones simultáneas realizadas en un mismo individuo presentan valores muy dispares, lo que nos lleva a pensar que la propia medición puede alterar la circulación de la savia de forma diferente en cada uno de los sensores, debido a las heridas infringidas al árbol, además de las propias diferencias circulatorias del individuo.

Para solucionar este problema sería necesario estudiar la variabilidad de los valores de velocidad obtenidos mediante técnicas estadísticas para poder establecer igualmente la precisión y exactitud de las medidas y conocer, de este modo, el error que se puede estar cometiendo. Estos valores nos permitirán establecer el nivel de confianza del sistema que es distinto del de los termopares y del de los grupos.

Se propone el diseño de un ensayo que contemple la medida en varios individuos de los que se pueda estimar la velocidad de flujo real en diferentes puntos, con distribución radial y en varias secciones del mismo y el análisis de los valores obtenidos para obtener valores de la variabilidad esperada en cualquier otro, estableciendo las diferencias entre individuos de diferentes especies, diámetros, LAI, etc.

Igualmente, se propone el diseño de un ensayo para medir la variabilidad en la velocidad obtenida de diferentes individuos de un mismo rodal, atendiendo a la especie, características de estación, disponibilidad hídrica, etc.

Con los datos obtenidos conoceremos el valor real de los datos obtenidos por el sistema de fabricación artesanal y se podrá comparar con valores obtenidos para otros sistemas de medición de flujo de savia a fin de establecer la idoneidad del sistema.

BIBLIOGRAFÍA

- ASBJORNSEN, H.; GOLDSMITH, G.R.; ALVARADO-BARRIENTOS, M.S.; REBEL, K.; OSCH, F.P.V.; RIETKERK, M.; CHEN, J.; GOTSCH, S.; TOBÓN, C.; GEISSERT, D.R.; GÓMEZ-TAGLE, A.; VACHE, K.; DAWSON, T.E.** (2011). Ecohydrological advances and applications in plant–water relations research: a review. *Journal of Plant Ecology* 4:3-22.
- BARRET, D.J.; HATTON, T.J.; ASH, J.E.;BALL, M.C.** (1994). Evaluation of the heat pulse velocity technique for measurement of sap flow in rainforest and eucalypt forest species of south-aestern Australia. *Plant, Cell and Environment*. 18, 463-469.
- BIROT, Y.; GRACIA, C.** (2011). The Hydrologic Cycle at a Glance: Blue and Green Water. In: “Water for forests and people in the Mediterranean region: a challenging balance. What Science Can Tell Us” (Biro Y, Gracia C, Palahi M eds). Joensuu, Finland, pp. 17-21.
- BROOKS, K.N.; FOLLIOTT, P.F.; GREGERSEN, H.M., DEBANO, L.F.** (2003). *Hydrology and the Management of Watersheds*. Iowa. Iowa State Press 575p.
- BURGESS, S.; ADAMS, M.; TURNER, N.; BEVERLY, C.; ONG, C.; KHAN, A.; BLEBY, T.** (2001). An Improved heat pulse method to measure low and reverse rates of sap flow in woody plants. *Tree physiology*. 21, 589-598
- COHEN, Y.; COHEN, S.** (2008). Variations in the radial gradient of sap velocity in trunks of forest and fruit trees. *Plant Soil*. 305, 45-59
- CALDER, I.R.** (2003). *Forests and Water – Closing the gap between public and science perceptions*. Estocolmo. Stockholm Water Symposium.
- DEKKER, SC.; BOUTEN, W.; VERSTRATEN, J.M.** (2000). Modelling forest transpiration from different perspectives. *Hydrological Process* 14:251–260.
- DEL CAMPO, A.; FERNANDES, T.; MOLINA, A.J.** (2014). Hydrology-oriented (adaptive) silviculture in a semiarid pine plantation: How much can be modified the water cycle through forest management?. *European Journal of Forest Research*..

- ESTRELA, T.; MARCUELLO, C.; DIMAS, M.** (2000). Las aguas continentales en los países mediterráneos de la Unión Europea. Centro de estudios hidrográficos del CEDEX, M. Fomento, M. Medio Ambiente, España.
<http://hercules.cedex.es/hidrologia/pub/doc/aguaconfinal.pdf>
- FITZGERALD, J.; JACOBSEN, JB.; BLENNOW, K.; THORSEN, BJ.; LINDNER, M.** (2013). Climate change in European forests: how to adapt. European Forest Institute-Policy Brief-N. 9, Joensuu, Finland.
- GARCÍA-RUIZ J.M.; LANA-RENAULT, N.** (2011). Hydrological and erosive consequences of farmland abandonment in Europe, with special reference to the Mediterranean region. A review. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 140: 317-338.
- GRANIER, A.** (1987) Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiology* 3:309–320.
- IPCC** (2007). Intergovernmental Panel on Climate Change. The Physical Science Basis. United Nations Environment Programme.
- JASECHKO, S.; SHARP, ZD.; GIBSON, JJ.; BIRKS, SJ.; YI, Y.; FAWCETT, PJ.** (2013). Terrestrial water fluxes dominated by transpiration. *Nature* 496:347-350
- LLORENS, P.; LATRON, J.; ÁLVAREZ-COBELAS, M.; MARTÍNEZ-VILALTA, J.; MORENO, G.** (2011). Hydrology and Biogeochemistry of Mediterranean Forests. Chapter 14. In: D.F. Levia et al. (eds.), *Forest Hydrology and Biogeochemistry: Synthesis of Past Research and Future Directions*, Ecological Studies 216 pp: 301-319.
- LINDNER, M.; MAROSCHEK, M.; NETHERER, S.; KREMER, A.; BARBATI, A.; GARCIA-GONZALO, J.; SEIDL, R.; DELZON, S.; CORONA, P.; KOLSTRÖM, M.; LEXER, MJ.; MARCHETTI, M.** (2010). Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management* 259:698–709.
- MACKAY, SL.; ARAIN, MA.; KHOMIK, M.; BRODEUR, JJ.; SHUMACHER, J.; HARTMANN, H.; PEICHL, M.** (2012). The impact of induced drought on transpiration and growth in a temperate pine plantation forest. *Hydrological Process* 26:1779-1791.

- MARSHALL, D.** (1958). Measurements of sap flow in conifers by heat transport. *Plant Physiology*. 33 (6), 385-395
- MOLINA, A.J.; DEL CAMPO, A.** (2012). The effects of experimental thinning on throughfall and stemflow: A contribution towards hydrology-oriented silviculture in Aleppo pine plantations. *Forest Ecology and Management* 269:206–213.
- ONU.** (2009). The United Nations World Water Development Report 3. Water in a changing world.
- SHICHUN, Z.; XUEFA, W.; JIANLIN, W.; GUIRUI, Y.; XIAOMIN, S.** (2010). The use of stable isotopes to partition evapotranspiration fluxes into evaporation and transpiration. *Acta Ecologica Sinica* 30,. 201-209
- TYLER W. DAVIS.; CHEN-MIN, K.; LIANG, X.; PAO-SHAN, Y.** (2012). Sap Flow Sensors: Construction, Quality Control and Comparison. *Sensors*, 12: 954-971.
www.mdpi.com/journal/sensors.
- UNGAR, ED.; ROTENBERG, E.; RAZ-YASEEF, N.; COHEN, S.; YAKIR, D.; SCHILLER, G.** (2013). Transpiration and annual water balance of Aleppo pine in a semiarid region: Implications for forest management. *Forest Ecology and Management* 298:39-51.
- VOROSMARTY, C.J.; GREEN, P.; SALISBURY, J.; LAMMERS, R.B.** (2000). Global water resources: vulnerability from climate change and population growth. *Science*. 289, 284-288
- WHITLEY, R.; TAYLOR, D.; MACINNIS-NG, C.; ZEPPEL, M.; YUNUSA, I.; O'GRADY, A.; FROEND, R.; MEDLYN, B.; EAMUS, D.** (2012). Developing an empirical model of canopy water flux describing the common response of transpiration to solar radiation and VPD across five contrasting woodlands and forests. *Hydrological Processes* 27:1133–1146.
- ZEPPEL, M.; MACINNIS-NG, C.; YUNUSA, I.; WHITLEY, R.; EAMUS, D.** (2008). Long term trends of stand transpiration in a remnant forest during wet and dry years. *Journal of Hydrology*, Volume 349, Issues 1–2, 30, Pages 200-213