

# 1

## Sensorización próxima autónoma, IoT y Cloud Data Centers para el seguimiento de la vegetación y las condiciones ambientales

**Antonio M. CACHINERO VIVAR**  
**Francisco J. RUIZ GÓMEZ**  
**Rafael M<sup>a</sup> NAVARRO CERRILLO**

### Resumen

El desarrollo de nuevos sensores con tecnologías inalámbricas y la gestión de datos en la nube permiten, en la actualidad, sustituir o complementar fácilmente las evaluaciones ecofisiológicas en masas forestales. Estos sensores facilitan la monitorización de parámetros biofísicos relacionados con variables fisiológicas con una precisión y frecuencia cada vez mayor y un coste cada vez menor. Este capítulo repasa los principios y la aplicación de la sensorización próxima autónoma de la vegetación a través de cuatro bloques: i) el contexto general sobre sensorización ambiental, ii) la descripción de los tipos de colectores de datos, iii) los conceptos y ejemplos de programación y procesado de datos de sensores en entornos forestales, y iv) las aplicaciones a ecosistemas forestales. También se detallan las consideraciones más generales que deben tenerse en cuenta en el diseño del trabajo de campo para estudios ecofisiológicos, destacando los compromisos de diseño (en sentido amplio, no sólo estadístico) y enfatizando las ventajas de una planificación adecuada, así como las diferentes opciones en cuanto a equipos disponibles. Por la especificidad de este libro, el capítulo se orienta a las variables biofísicas de mayor interés en teledetección forestal y a su relación con otras variables estructurales. Por tanto, el objetivo del capítulo es ofrecer información actualizada sobre sensorización forestal como una herramienta de trabajo para todos aquellos interesados en los aspectos más prácticos de la ecofisiología forestal y su relación con la teledetección. Se ofrece, además, información sobre sensorización en estudios de “campo” y sobre las limitaciones o requerimientos que su uso impone en el diseño experimental a diferentes escalas espaciales y temporales en función de las variables que se estudian.

**Palabras clave:** ecofisiología forestal, datos continuos, sensorización, series temporales, integración de datos.

## 1. Introducción

El seguimiento de las masas forestales mediante teledetección es una de las aplicaciones más evidentes de las TIC y de los Sistemas de Información Geográfica a la gestión forestal. La modelización de los procesos de transformación y adaptación de las masas forestales a partir de teledetección ha experimentado un importante auge en los últimos años de la mano de los avances en ecofisiología vegetal y en sensorización remota y próxima. En la actualidad, la determinación del estado fisiológico de la vegetación, y más concretamente del arbolado, es más fácil y rápida y genera grandes volúmenes de datos. Esto ha contribuido a mejorar la estimación de procesos ecofisiológicos relacionados con la producción, el estrés biótico y abiótico, la identificación de rasgos morfofisiológicos relevantes y la modelización espacial de estos parámetros y sus relaciones con los factores ambientales en los sistemas forestales.

La ecofisiología es la ciencia que estudia la interacción de las plantas con el medio, así como sus procesos de aclimatación y adaptación a través de la evaluación de relaciones entre el estado fisiológico de la planta (fotosíntesis, respiración, crecimiento, etc.) y los factores ambientales (clima, medio, perturbaciones, patógenos, etc.) (Prasad, 1996). Los estudios ecofisiológicos en plantas abarcan todos los niveles de organización biológica, desde los relacionados con la activación de genes y cambios metabólicos a nivel celular, los ajustes fisiológicos a diferentes escalas temporales, los cambios anatómicos y morfológicos de individuos genéticamente similares creciendo en sitios con distinta oferta de recursos, hasta las adaptaciones diferenciales de ecotipos y especies a distintas condiciones ecológicas. En este capítulo se describen las principales variables biofísicas que pueden relacionarse con la teledetección, así como los equipos existentes, basados en distintas técnicas, que se utilizan en la actualidad en este tipo de estudios. Por supuesto, el desarrollo de técnicas de cuantificación y análisis de variables biofísicas está en permanente avance, yendo a veces más rápido aún que el desarrollo de los conceptos teóricos relativos a los principios biológicos de las variables que se intentan medir.

Uno de los aspectos más relevantes en este desarrollo es el volumen de datos y el sistema de recolección de éstos. Por norma general, la recolección de datos de variables biofísicas en el arbolado es un proceso más o menos tedioso que requiere personal especializado. Los datos tomados con equipos de alta precisión (cámaras de intercambio gaseoso, equipos de medida de fluorescencia, equipos de medida de potenciales hídricos, determinación de pigmentos en hoja, etc.) se obtienen en campañas de campo muy intensivas, generalmente limitadas a varias parcelas experimentales y decenas de árboles, y que conllevan esfuerzos económicos y de personal importantes. En este contexto es donde se hace relevante el desarrollo tecnológico asociado a la sensorización. Los equipos tradicionales de medida de estas variables han sido sustituidos por otros basados en tecnologías de transmisión de señales (Wireless, Bluetooth, LoRA) y gestión de datos basados en la nube (*Cloud Data Base*). Dichos sensores detectan, con una precisión y una frecuencia cada vez mayores, variaciones en parámetros biofísicos que se relacionan con las variables que se miden con los equipos de fisiología tradicionales. La evolución de los sensores hacia tecnologías más

portables ha reducido de forma muy importante los costes de la sensorización próxima (referida a sensores en contacto o muy próximos al objeto de medida) y del mantenimiento de los sistemas de recolección de datos, incrementando el volumen de datos disponibles e, incluso, ofreciendo la posibilidad de integrar sistemas de *Big Data* a la gestión forestal a partir de la monitorización de variables biofísicas del arbolado en tiempo real.

El Máster GEOFOREST cuenta con un grupo de investigación de referencia en ecofisiología de sistemas forestales que ha desarrollado un valioso trabajo de puesta a punto de técnicas de medición en ecofisiología vegetal y teledetección y de técnicas para la adquisición y el análisis de datos relacionados con la ecofisiología de especies forestales. El contenido del capítulo se basa en diferentes trabajos de investigación que integran la ecofisiología de campo y la teledetección (ver, por ejemplo, Navarro-Cerrillo *et al.*, 2019; 2014; Ariza Salamanca *et al.*, 2019), pero también se incluyen conceptos que son necesarios para aplicar las técnicas de sensorización en campo. No obstante, por simplicidad, se han priorizado aquellos aspectos de la ecofisiología, y las variables biofísicas asociadas, que tienen una mayor importancia para el estudio de la ecología funcional de los ecosistemas forestales, como el intercambio gaseoso, las relaciones hídricas, la superficie foliar, la fluorescencia de la clorofila, los pigmentos de hoja y la nutrición, variables todas ellas relacionadas con la respuesta ecofisiológica de las plantas y asociadas a procesos que pueden ser detectados y evaluados mediante sensores remotos.

Cabe aclarar que este capítulo se refiere a la sensorización próxima, ya que este tipo de sensores es el que aporta la mayor parte de la información que se va a necesitar para caracterizar una masa forestal o una planta desde el punto de la ecofisiología. No obstante, en los sistemas de monitorización que se van a presentar se utilizan también sensores que se consideran estrictamente “remotos” para monitorizar variables locales, como los sensores de temperatura de copa, radiación solar recibida, transmitancia de copa, etc. No hay que confundir aquí la definición de sensores remotos con la descripción de sistemas de medida en remoto, a la que se hace referencia en el título del libro, que describe sistemas de medida que envían datos y reciben instrucciones de forma no presencial o no supervisada. Quedan para futuras versiones de este capítulo la descripción de los aspectos relacionados con la interceptación de radiación (modelos tridimensionales de copa), además de posibles técnicas alternativas para medir otras variables estructurales.

### **1.1. Conceptos del diseño experimental en ecofisiología aplicada a la teledetección**

El diseño experimental de un trabajo de campo de ecofisiología aplicada a la teledetección se refiere al dimensionamiento de un dispositivo de recolección de datos que responda de forma adecuada a tres preguntas básicas: “qué”, “cómo” y “dónde” (Figura 1.1). El “qué” se refiere a él o los procesos que se quieren modelar, que se traduce en las variables fisiológicas imprescindibles y relevantes que se pretenden medir. El “dónde” resulta especialmente relevante en ecofisiología, ya que la heterogeneidad de los factores

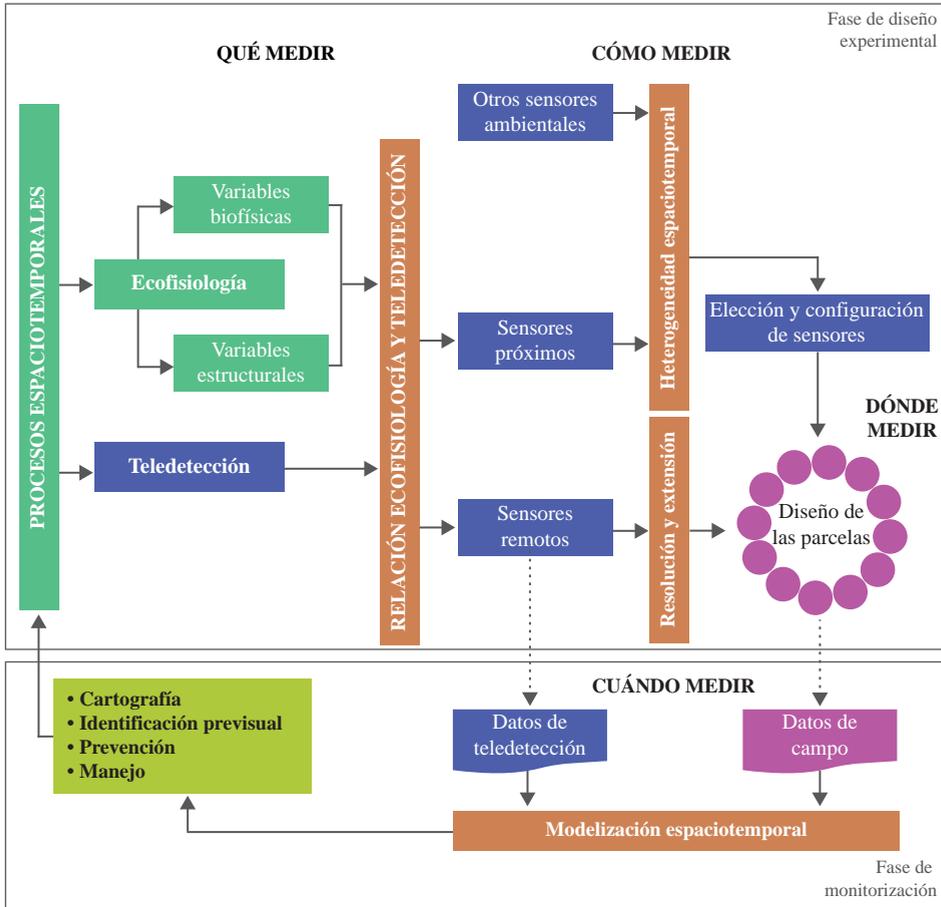
ambientales es una de las características ineludibles en los entornos forestales. Sin dejar de lado la importancia de la localización de los sensores en la planta (el órgano que se va a medir, la estandarización de las medidas, la heterogeneidad de una copa debido a la exposición, etc.), nos centraremos en la heterogeneidad espacial a nivel de masa. Esta pregunta se refiere, pues, a la localización o al conjunto de localizaciones que nos aportarán el rango mínimo de variación necesaria para que los resultados finales sean representativos de la realidad que se pretende evaluar o estudiar. Finalmente, el “cómo” es el eje principal de este capítulo, ya deberá adecuarse a las tecnologías disponibles en cada caso, teniendo en cuenta, en ocasiones, la necesidad de realizar modelos de calibración usando otros sistemas de medida tradicionales (*upscaling*).

Una pregunta adicional sería “cuándo”. La mayor parte de los sistemas de sensorización autónoma en remoto están diseñados para monitorizar procesos continuos, pero normalmente habrá que determinar un horizonte temporal de medición que sea suficiente para responder a las cuestiones planteadas. Este horizonte temporal dependerá de los procesos de interés y su relación con los ciclos ambientales y fenológicos, pero también de otras cuestiones, como la disponibilidad de la tecnología, la necesidad de calibración y, finalmente, los recursos económicos y el personal disponibles. Por otro lado, en relación sobre todo con las necesidades de calibración, se deberán plantear una o varias campañas de medida discretas de variables fundamentales, que serán necesarias para modelizar la respuesta de los sensores próximos y su relación con los datos de sensores remotos (teledetección).

Por tanto, el diseño experimental siempre debe dimensionarse considerando un compromiso entre el esfuerzo instrumental y de muestreo y los recursos disponibles, prestando especial atención a los medios instrumentales y humanos y el tiempo necesario para hacer las observaciones. Un adecuado diseño debe lograr adecuarse al objetivo científico-técnico del trabajo, asegurando su validez estadística para el conjunto de variables que se quiere medir.

## 1.2. “Qué” medir

Las variables usadas para evaluar las respuestas de las plantas se pueden clasificar en dos tipos básicos: estructurales y funcionales (Fernández y Gyenge, 2010) (Tabla 1.1). Las variables estructurales describen y analizan los mecanismos morfogénicos de aparición y expansión de nuevos órganos en la planta y su desaparición por senescencia. En sistemas forestales, algunos ejemplos de variables estructurales son la biomasa de las plantas, el área foliar o la fenología del crecimiento. En general, su medición implica la toma de muestras físicas de las plantas, aunque algunas se puedan determinar de forma no destructiva mediante equipos de campo (ej., el índice de área foliar) o a través de modelos numéricos (ej., la biomasa). Se trata de variables que se obtienen de muestras que presentan cierta capacidad de almacenamiento (ya sea secas, bajo frío o con líquidos conservantes), lo que permite una mayor flexibilidad en el muestreo.



**Figura 1.1.** Esquema conceptual del flujo de decisión para el diseño de un sistema de sensorización de ecofisiología en trabajos de teledetección. Los elementos dispuestos en vertical hacen referencia a las características del sistema que catalizan las decisiones a tomar.

Las variables funcionales se pueden subdividir en dos subtipos: los rasgos funcionales y los rasgos fisiológicos (Violle *et al.*, 2007). Los primeros incluyen los atributos morfológicos, fisiológicos o fenológicos, propios de los organismos, que determinan su eficacia biológica y, por tanto, su éxito bajo determinadas condiciones ambientales. Por su parte, los rasgos fisiológicos (o ecofisiológicos) describen el estado relativo de aptitud de las plantas como respuesta a los factores ambientales. Estas variables funcionales son esenciales para comprender cómo las especies asignan los recursos disponibles y, por tanto, determinan la respuesta de las plantas ante variaciones de las condiciones ambientales. Estas variaciones ambientales no afectan nunca a un único rasgo o variable, por lo que elegir los que mejor describan la respuesta de la vegetación nunca es sencillo.

**Tabla 1.1.** Descripción, abreviación y unidades más frecuentes en la literatura científica de las variables funcionales y estructurales relacionadas con trabajos de teledetección.

Variables funcionales			
Variable	Descripción	Abrev.	Unidades
<b>Eficiencia cuántica</b>	Eficiencia del aparato fotosintético (PSII). Moles de CO <sub>2</sub> fijados por mol de fotones absorbidos.	Φ	Adimensional
<b>Punto de compensación a la luz</b>	Nivel de irradiancia al cual la tasa de fotosíntesis es balanceada con la tasa de respiración	LCP	μmol fotones m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
<b>Punto de saturación a la luz</b>	Nivel de irradiancia por encima del cual la tasa de fotosíntesis es insensible a la intensidad lumínica	LSP	μmol fotones m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
<b>Tasa de asimilación de CO<sub>2</sub></b>	Tasa de fotosíntesis máxima expresada en unidades de superficie aérea		μmol CO <sub>2</sub> m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
<b>Tasa de pérdida de CO<sub>2</sub></b>	Tasa de respiración expresada en unidades de superficie por área		μmol CO <sub>2</sub> m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
<b>Conductancia estomática</b>	Conductancia de la difusión de CO <sub>2</sub> y vapor de agua a través de los estomas	gs	mmol H <sub>2</sub> O m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
<b>Tasa de asimilación de CO<sub>2</sub></b>	Tasa de fotosíntesis máxima expresada en unidades de masa	Apeso	nmol CO <sub>2</sub> g <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>
<b>Tasa de pérdida de CO<sub>2</sub></b>	Tasa de respiración expresada en unidades de masa	Rpeso	nmol CO <sub>2</sub> g <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>
<b>Eficiencia en el uso del agua</b>	Relación entre la asimilación de CO <sub>2</sub> y la pérdida de vapor de agua	WUE	μmol CO <sub>2</sub> (mmol H <sub>2</sub> O) <sup>-1</sup>
<b>Eficiencia en el uso del N</b>	Relación entre la asimilación de CO <sub>2</sub> y la concentración de nitrógeno	PNUE	μmol CO <sub>2</sub> (mol N) <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>
<b>Temperatura de hoja</b>	Temperatura en el interior de la hoja o del dosel, estimada a partir de infrarrojos	T	°C
<b>Concentración de pigmentos</b>	Cantidad de pigmentos contenidos en hoja por unidad de peso o superficie	Pigmento	mg g <sup>-1</sup> / mg cm <sup>-2</sup>
<b>Índice de epoxidación</b>	Índice de transformación de la violaxantina en el ciclo VAZ	EPS	Adimensional
<b>Índice de depoxidación</b>	Índice de relación de formación de zeaxantina en el ciclo VAZ	DPS	Adimensional

Variable	Descripción	Abrev.	Unidades
<b>Variables estructurales</b>			
Área foliar	Superficie de una hoja o dosel	Área	cm <sup>2</sup>
Área específica foliar	Relación entre el área foliar y la biomasa foliar	SLA	cm <sup>2</sup> g <sup>-1</sup>
Índice de área foliar	Superficie de una hoja o dosel que intercepta radiación solar por unidad de superficie de terreno	LAI	Adimensional
Porcentaje de cobertura del suelo	Superficie relativa de suelo cubierta por la proyección del dosel en un área determinada	%C	%
Crecimiento diametral	Incremento diametral por unidades de tiempo (horas, días, meses...)	ΔØ	cm tiempo <sup>-1</sup>
Contenido de nitrógeno	Cantidad de nitrógeno, expresado en unidades de masa o en unidades de superficie	Npeso / Nsup	mg g <sup>-1</sup> / mg cm <sup>-2</sup>

Los rasgos funcionales de mayor interés en el ámbito de la teledetección y la modelización de procesos son siempre aquellos cuantificables numéricamente (es decir, de los que podemos estimar un valor para cada especie, cada conjunto de individuos o cada planta individual) y que describen variaciones a lo largo de gradientes ambientales y/o temporales. En la mayoría de las ocasiones, se opta por rasgos funcionales relacionados con las características foliares (superficie de hoja por unidad de masa, área foliar específica, cantidad y perfil de pigmentos) y el intercambio de agua y gases (fotosíntesis, conductancia estomática, potencial hídrico), que son variables que han mostrado relaciones consistentes con datos procedentes de sensores remotos.

Otras variables que deben tenerse en cuenta en los diseños experimentales son las llamadas “de documentación”. Estas variables proveen la referencia necesaria para interpretar las variables estructurales y funcionales (ej., composición química de los tejidos, datos dendrocronológicos, datos meteorológicos, etc.) y, en muchos casos, pueden evaluarse sin necesidad de instrumental costoso. Por ejemplo, la diferencia de precipitación, el déficit de presión de vapor o la diferencia en potencial hídrico del suelo pueden inferirse a partir de datos de las plantas mismas, tales como la fenología del crecimiento (ej., dendrocronología).

### 1.3. “Cómo” medir

No se puede considerar el uso de sensores más o menos avanzados tecnológicamente como una novedad en el campo de la ecofisiología. Un sensor no es más que un dispositivo capaz de transformar una magnitud física en una señal, normalmente eléctrica, que después es traducida, almacenada y procesada por uno o varios dispositivos diferentes. Todos los equipos utilizados para la toma de datos de variables fisiológicas y estructurales de la vegetación utilizan sensores. Algunos ejemplos son los sensores de infrarrojos de los equipos de intercambio gaseoso para medir fotosíntesis (*Infrared gas analyzer* - IRGA), que transmite la absorbancia del aire en el infrarrojo a una señal eléctrica, o el sensor de la cámara de Scholander para medir potenciales hídricos en la planta, que transmite una señal mecánica de un sensor de presión a un manómetro mecánico o digital.

Sin embargo, el desarrollo de las tecnologías de comunicación inalámbricas, la miniaturización de los sistemas electrónicos, la aparición de microprocesadores de bajo coste y el uso de plataformas tecnológicas como el “Internet de las cosas” (IoT) han permitido la aparición de nuevos sensores próximos autónomos. Estos sensores son de fácil instalación, requieren una baja intensidad de supervisión de la medida y reducen el tiempo de obtención de ciertas variables funcionales (ej. flujo de savia) y estructurales (ej. dendrómetros). Pero no todas las variables pueden ser monitorizadas con este tipo de sensores. Por ejemplo, para medir fotosíntesis se necesita un equipo de circuito cerrado de gases que sería difícil de instalar en un sensor autónomo de bajo coste sin supervisión frecuente.

Por tanto, resulta muy importante conocer cómo podemos medir nuestras variables antes de decidir qué vamos a medir. En la mayoría de los casos se puede encontrar una alternativa a las variables fisiológicas y estructurales más complicadas de obtener, que se relaciona con los mismos fenómenos. Así, por ejemplo, parámetros como el flujo de savia, la apertura estomática y el potencial hídrico se encuentran íntimamente relacionados, por lo que, si se detectan variaciones en una de estas variables, se puede asumir que las otras también varían. La forma en la que varían será diferente dependiendo de una serie de parámetros que se deben controlar a través de las variables de documentación o de *scaling up* y modelización de medidas de fisiología. Para estos registros, se puede contar con la ayuda de los sensores ambientales compatibles con registradores automáticos.

En los próximos epígrafes se revisarán diferentes tipos de sensores, sus fundamentos de medida y las variables relacionadas. La elección del sensor dependerá, pues, de las variables que se deseen obtener; éstas a su vez, se seleccionarán en función de los procesos que interese monitorizar o analizar, todo ello condicionado por la relación de las variables obtenidas con las tecnologías de sensores remotos y teledetección que se vayan a utilizar en cada caso.

#### **1.4. Escala del estudio y duración del experimento: “donde” y “cuándo”.**

Estos aspectos son especialmente relevantes en los estudios que integran ecofisiología y teledetección, tanto en los aspectos espaciales (ej., árbol-rodal-masa), como en la “temporalidad” del estudio y la disponibilidad de datos procedentes de sensores. Por lo tanto, una vez decidido el diseño experimental (incluyendo las variables que se van a medir), se requiere establecer el arreglo espacial de las unidades experimentales y la temporalidad de las mediciones.

Un análisis previo puede obligar a reconsiderar el número de variables respuesta, la frecuencia de las medidas o la capacidad instrumental y humana para su obtención. En general, las variables estructurales son más sencillas de programar y de medir, aunque muchas veces son de carácter destructivo. La toma de medidas de variables funcionales requiere un mayor apoyo instrumental y más tiempo de medición en campo, estando sujetas, en muchos casos, al cambio en las condiciones ambientales a lo largo de las mediciones (ej., nubosidad, hora del día, etc.). Este hecho limita mucho el número de repeticiones posibles cada día en el caso de las medidas de apoyo o calibración. La valoración de todos estos aspectos determina el número y frecuencia de las mediciones, teniendo presente que, como en cualquier diseño experimental factorial (frecuente en este tipo de estudios), a medida que aumenta el tamaño del experimento su diseño se va haciendo cada vez más complejo.

Por tanto, en los estudios ecofisiológicos aplicados a la teledetección, es muy importante llegar a un compromiso entre las variables medidas (número y facilidad de medición, importancia de las variables para explicar el proceso que se quiere

estudiar) y la validez y aplicabilidad del diseño experimental (número y frecuencia de las medidas, recursos disponibles), sin olvidar otros aspectos relacionados con la elección del sensor (que se verán en capítulos posteriores). También se debe considerar el volumen de datos a manipular. Los sensores próximos autónomos utilizados para el monitoreo continuo pueden dar lugar a una gran cantidad de datos, que se multiplica por las repeticiones establecidas en el diseño experimental y que hay que almacenar y analizar siguiendo unos estrictos protocolos que aseguren la trazabilidad. Esto supone un importante esfuerzo en personal especializado, por lo que también es necesario evaluar la disponibilidad de este tipo personal a la hora de dimensionar los trabajos.

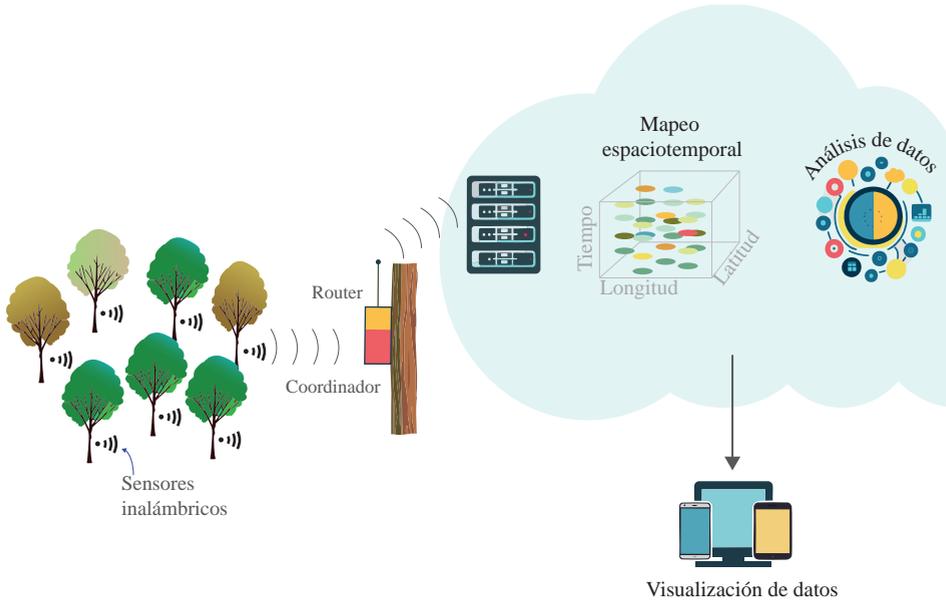
En estos trabajos, dada la complejidad y el costo de trabajo, material e instrumental de realizar las mediciones, es muy importante partir de una hipótesis bien definida, con un adecuado soporte científico que se sustente en una buena revisión de los antecedentes científico-técnicos del problema que se quiere investigar o evaluar. Solo así será posible determinar qué aspectos de la investigación pueden ser respondidos en el marco de los recursos materiales y humanos disponibles. Por su parte, una correcta identificación de niveles de organización, escalas espaciales y periodos de medición también ayuda a la definición de las preguntas y los objetivos de la investigación. Estas características del diseño experimental determinan, en gran medida, las opciones de sensorización y limitan las opciones metodológicas.

## 2. Sensores próximos autónomos

### 2.1. Introducción

En las dos últimas décadas, el progreso de la ingeniería de materiales y los sistemas de programación han permitido miniaturizar equipos para la obtención, el preprocesado, el almacenamiento y el envío de datos (Raghavendra *et al.*, 2006). Estos avances han dado lugar a un incremento de la oferta de sensores de pequeño tamaño que pueden programarse fácilmente e integrarse en redes coordinadas por dispositivos autónomos (Figura 1.2).

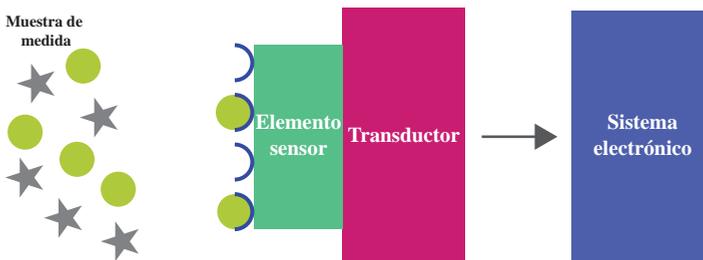
Estos dispositivos autónomos, también llamados coordinadores, se comunican con los dispositivos que hay a su alrededor, reconocen los distintos sensores y organizan espacial y temporalmente la adquisición de información ecofisiológica y permiten trabajar con un amplio abanico de sensores para, finalmente, transmitir la información a sistemas de procesamiento de bases de datos remotos en la nube (*Cloud Data Centers*). A su vez, éstos almacenan y organizan los datos recibidos y ofrecen otras funcionalidades, como los sistemas de seguridad y respaldo de datos o las conexiones remotas a través de pasarelas seguras y conexiones de datos. El desarrollo de estas tecnologías en el ámbito de la monitorización ambiental permite la transmisión de datos en tiempo real y el establecimiento de un gran número de puntos de monitoreo de bajo coste (Valentini *et al.*, 2019).



**Figura 1.2.** Esquema conceptual de la organización de una red de sensores próximos inalámbricos conectados a centros de datos en la nube.

## 2.2. Algunas definiciones a tener en cuenta

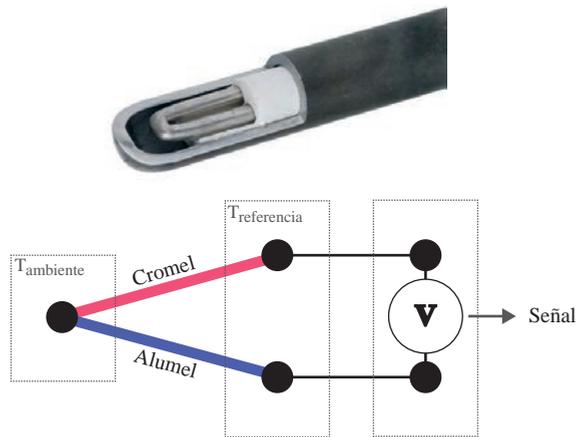
Un sistema de medida autónomo está compuesto por el sensor, el transductor y el colector de datos (Figura 1.3). El esquema básico representado en dicha figura muestra los dispositivos suficientes para el proceso completo, desde la toma del dato hasta su almacenamiento, aunque podría incluir dispositivos adicionales en función de la complejidad del sistema de medida. A continuación, se describen estas partes básicas de un sistema de medida autónomo, ilustrándolas con un ejemplo. En ocasiones se hace referencia a marcas concretas, pero no debe entenderse como publicidad o recomendación, sino como ejemplos de dispositivos que son o han sido ampliamente utilizados por ecofisiólogos.



**Figura 1.3.** Esquema de la estructura básica de un sistema de recogida de datos a partir de un sensor.

## Sensor

Un sensor es un dispositivo que dispone de una propiedad física, química o mecánica medible, que puede variar en función de las condiciones del medio y generar una señal de respuesta (normalmente de tipo eléctrico) proporcional a esa variación como consecuencia de estímulos o señales físicas o químicas. Dicha señal debe poder ser interpretada por el transductor. Esta señal puede ser directamente enviada a un dispositivo electrónico a través de una interfase o interfaz, o bien ser traducida por el transductor (ver ejemplo de sensor en la Figura 1.4).



**Figura 1.4.** Ejemplo de sensor: Termopar. Un termopar mide la temperatura del medio en el que se encuentre a través de la diferencia de potencial eléctrico entre dos metales distintos, que es función de la temperatura en la unión entre los metales (efecto Seebeck). Cuando la temperatura del medio varía, la temperatura de los dos metales lo hace de forma diferente; esos diferenciales se corresponden con un voltaje único (señal).

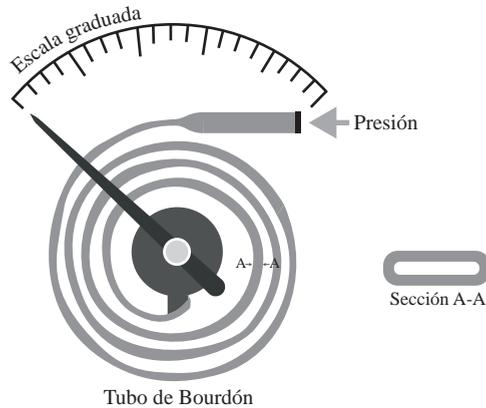
## Transductor

Se trata de un dispositivo electrónico que convierte una señal recibida de los sensores en otra señal de naturaleza diferente (datos o lecturas). La conversión puede ser de una señal física o química a una señal eléctrica (transductor de entrada) o viceversa (transductor de salida), o incluso puede no involucrar señales eléctricas (por ejemplo, un bimetálico convierte cambios de temperatura en cambios de curvatura del dispositivo) (ver ejemplo de transductor en Figura 1.5).

## Sistema colector

Normalmente los transductores permiten almacenar los códigos leídos en una memoria interna, actuando como sistemas colectores. Estos datos pueden ser transferidos directamente a un ordenador de escritorio o a un sistema colector electrónico independiente,

generalmente por medio de un archivo de texto. A diferencia de la transmisión de datos o señales desde el sensor a un dispositivo electrónico por una interfase, los transductores de datos pueden funcionar independientemente del ordenador o de otros dispositivos electrónicos (Figura 1.6).



**Figura 1.5.** Ejemplo de transductor mecánico: Manómetro. Los manómetros mecánicos transmiten la presión en una posición de un indicador dentro de la escala correspondiente a través de un muelle o un diafragma.



**Figura 1.6.** Ejemplos de sistemas colectores: transductores inteligentes que reconocen la señal de algún sensor y se autoprograman (ej., estación meteorológica HOB0 Micro Station Data Logger (sup.)) y colectores independientes que recogen a través de puertos de datos la información con respecto a la señal eléctrica, la tasa de adquisición y almacenamiento del dato (ej., colector de datos CR1000X de Campbell Scientific Inc.(inf.)).

Uno de los aspectos más importantes cuando se trabaja con sensores es cómo elegir un sensor específico para medir una determinada variable. Por ejemplo, existe una gran variedad de sensores de temperatura (termopares, RDTs, termistores, sensores integrados, etc.), así como innumerables modelos y marcas, lo que complica la decisión. Por ello, es importante tener claro los siguientes conceptos básicos necesarios tanto para definir los componentes del sistema como para obtener datos “legibles” traducidos a partir de las señales:

- **Curva de calibración (o curva característica).** La construcción y validación de la curva característica es uno de los pasos más importantes en el proceso de medida con sensores ya que relaciona la variable medida y la señal generada. Se obtiene aplicando una serie de entradas físicas conocidas y almacenando la respuesta del sistema.
- **Rango de medida.** Define el intervalo de valores (comprendido entre el máximo y el mínimo) de la variable de interés que es capaz de medir un determinado sensor con una tolerancia de error aceptable. Por ejemplo, el sensor de referencia (utilizado para calibrar o comparar) tiene un campo de medida entre 0 y 100 % HR.
- **Margen o alcance.** Es la diferencia algebraica entre los valores máximo y mínimo que el sensor es capaz de medir. Para el ejemplo anterior, el margen sería de  $50\text{ }^{\circ}\text{C} - (-10\text{ }^{\circ}\text{C}) = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- **Sensibilidad.** Indica la magnitud mínima a la cual responde el sensor. Por ejemplo, un sensor de referencia de HR tiene una sensibilidad de  $46\text{mV kPa}^{-1}$ , lo que indica que la variable de entrada es voltaje (mV), la de salida es humedad (kPa) y que por cada kPa que aumente la humedad, el voltaje se incrementará en 46mV. En determinados casos, la sensibilidad puede variar dependiendo del rango de medida. En el ejemplo de la curva de calibrado del ejemplo anterior, no lineal, podemos calcular la sensibilidad a lo largo del rango de voltaje.
- **Resolución.** Indica el mínimo cambio que el sensor es capaz de medir en la escala considerada; por tanto, determina la capacidad que tiene un sensor para medir cambios pequeños en la variable de interés. En este sentido, un equipo puede tener una alta resolución y sensibilidad, pero baja exactitud.
- **Exactitud.** Es la capacidad de un sensor para dar valores de medida lo más próximos posibles al valor real de la magnitud analizada. Por ejemplo, un sensor térmico que indica una temperatura de  $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ , cuando la real es  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , tiene una inexactitud de  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  en la medición (expresada en la unidad de la variable medida o en porcentaje). La exactitud depende de varios factores, pero principalmente del funcionamiento del sensor o de la calibración (por ej., por comparación con un sensor calibrado), por lo que los sensores deben revisarse previamente a su uso y leer detenidamente sus especificaciones. La exactitud se puede estimar en una curva de calibración a partir de la distribución de los residuos de la función (valores observados vs. valores ajustados).
- **Precisión (o repetibilidad).** Expresa la dispersión de la medida, es decir la capacidad del sensor de entregar el mismo valor de medida en mediciones repetidas bajo las

mismas condiciones. Por ejemplo, al medir repetidamente una temperatura de 20 °C, el sensor puede dar valores diferentes (por ej., 20,1 °C; 19,8 °C; 20,3 °C, 19,7 °C). En este caso tenemos una desviación de  $20,3 - 19,7 = 0,6$  °C (precisión:  $\pm 0,2$  °C y  $\pm 2,5\%$  HR20 °C  $\pm 0,6$  °C). El sensor puede ser exacto pero impreciso; o puede ser muy impreciso (a 20°C da un valor de 25°C) pero muy preciso, ya que muestra una buena repetibilidad (por ej., 25 °C; 25,1 °C; 24,9 °C).

- **Tiempo (velocidad) de respuesta.** Se refiere al tiempo que necesita un sensor para detectar un cambio en la variable medida y el respectivo cambio en la variable de salida. Este tiempo depende del sensor; por ej., el tiempo de respuesta del sensor de referencia es 15 segundos.
- **Linealidad.** Representa la proximidad de la curva característica de un sensor a una recta especificada. Si la curva es una línea recta, el sensor es lineal en su comportamiento, y la sensibilidad es constante; esto facilita las lecturas y la interpretación de los datos del sensor. Sin embargo, muchos sensores tienen curvas características no lineales, es decir que la curva característica del sensor se desvía de una línea recta ideal.
- **Histéresis.** Indica la diferencia entre los valores de salida correspondientes a la misma entrada según la trayectoria seguida por el sensor, es decir según si la variable medida va en incremento o va disminuyendo. Cuando esto sucede se dice que el sensor presenta histéresis. Por ejemplo, en el sensor de referencia se indica que la precisión es de  $\pm 2,5\%$  desde 10% a 90% (típico) hasta un máximo de  $\pm 3,5\%$  incluyendo histéresis a 25 °C. Es decir que, a esa temperatura, el sensor se comporta de forma ligeramente diferente.

### Ejemplo 1

#### Ajuste de curva de calibración de un sensor de humedad de suelo TDR de fabricación casera

La calibración se realiza para un suelo franco-arcilloso con una capacidad de retención de agua del 60%. Para ello se instaló el sensor y se registraron los voltajes a capacidad de campo, y durante el proceso de secado del suelo, hasta una humedad volumétrica de 0.2 aproximadamente (20%).

El ejemplo se puede replicar paso a paso accediendo a los siguientes materiales:

- Datos: calibración\_TDR.csv
- Script: Ejemplo1-code.R

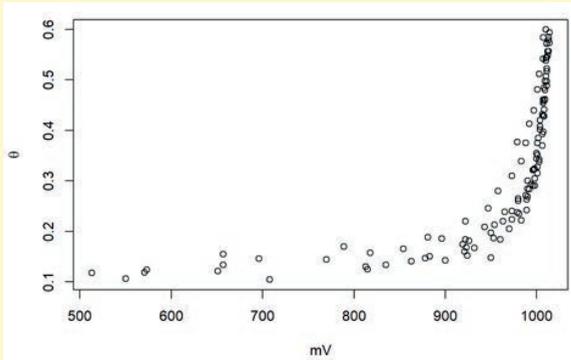
Para el ejemplo se utiliza lenguaje de programación R. Se puede copiar el código del archivo de script en una consola de R y ejecutarlo línea a línea. El código incluye la conexión directa a la fuente de datos, por lo que no es necesario precargar los datos en la máquina local.

La fuente de datos es una tabla almacenada en formato csv, que contiene los valores de voltaje suministrados por el sensor, con la humedad volumétrica correspondiente a cada caso, medida directamente en las muestras de suelo:

```
## V tita
## 1 1010 0.5992967
## 2 1014 0.5935430
```

```
## 3 1013 0.5848532
## 4 1007 0.5842133
## 5 1013 0.5787223
## 6 1014 0.5734501
```

Podemos también representar estos datos gráficamente para ver la forma que tiene su distribución:



Rango de medida:

Utilizaremos las funciones máximo (max()) y mínimo (min()) para determinar los valores máximos y mínimos de voltaje de la serie.

Máximo: 1014

Mínimo: 513

Margen:

Calcularemos la diferencia entre el valor máximo y el mínimo de humedad

Margen: 0.4946355

Ajuste de la curva de calibrado:

La curva se puede ajustar de diversas formas. Después de realizar varias pruebas, se comprueba que la función que mejor se ajusta a la distribución de los datos es una polinomial de grado 3:

## Residuals:

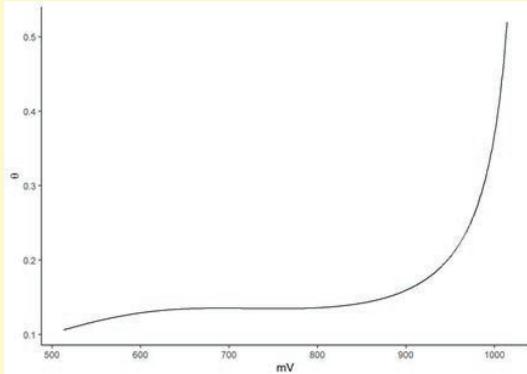
```
## Min 1Q Median 3Q Max
## -1.5058 -0.2730 0.0015 0.3752 2.1511
```

## Coefficients:

```
## Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## (Intercept) 9.545e+01 1.439e+01 6.635 1.17e-09 ***
## V -3.665e-01 5.629e-02 -6.510 2.15e-09 ***
## I(V^2) 5.074e-04 7.161e-05 7.086 1.26e-10 ***
## I(V^3) -2.337e-07 2.974e-08 -7.858 2.50e-12 ***
## ---
## Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
## Residual standard error: 0.5847 on 113 degrees of freedom
## Multiple R-squared:  0.9205, Adjusted R-squared:  0.9184
## F -statistic: 436.1 on 3 and 113 DF, p-value: < 2.2e-16
```

A partir de este resultado se pueden transformar los valores de voltaje en contenido volumétrico de agua en el suelo, aplicando la función polinomial de 3er grado que contenga los parámetros del modelo (*estimate*). Dichos parámetros se pueden extraer mediante código, también para representar la curva característica del sensor:



## Ejemplo 2

### Ajuste de curva de sensibilidad y cálculo de la resolución de un sensor de humedad de suelo TDR de fabricación casera

Se utilizan los datos ajustados del Ejemplo 1 para eliminar la influencia de los errores.

- Datos: fitdata-TDR.csv
- Script: Ejemplo2-code.R

Calculamos la tasa de cambio por la variación unitaria de voltaje

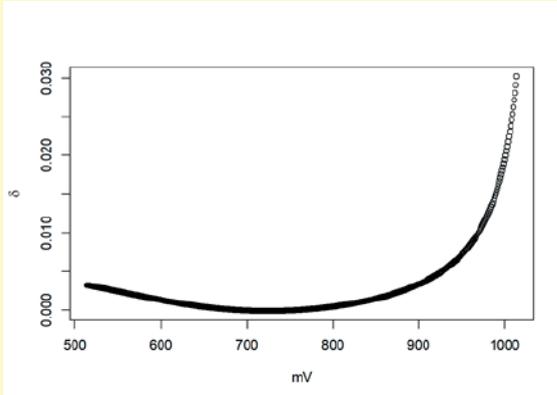
```
## volt deltatheta
## 1 514 0.003211522
## 2 515 0.003190411
## 3 516 0.003169217
## 4 517 0.003147939
## 5 518 0.003126581
## 6 519 0.003105143
```

El sensor calibrado tiene una sensibilidad casi nula para el rango entre 700 y 750 mV, mientras que muestra una gran sensibilidad para valores por encima de los 900 mV. Por tanto, es adecuado para medir suelos húmedos, pero no tan adecuado en suelos relativamente secos.

La resolución será el mínimo cambio en contenido volumétrico que es capaz de detectar por unidad de voltaje. Se utiliza el mínimo en valor absoluto de la matriz de diferencias:

[1] 2.981374e-07

El sensor tiene una resolución muy elevada, de 0.0003 % V<sup>-1</sup>



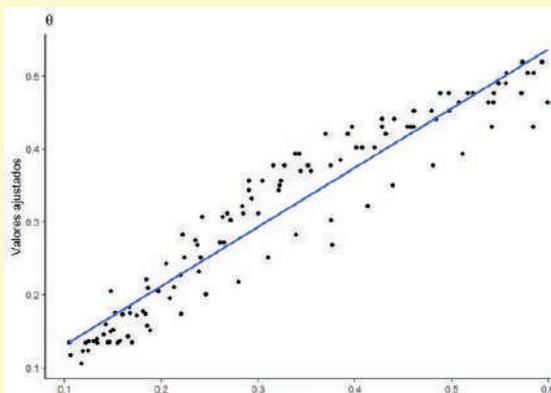
### Ejemplo 3

#### Curva de precisión del sensor

Partimos de los mismos datos del ejemplo 1.

- Datos: calibración\_TDR.csv
- Script: Ejemplo3-code.R

#Hay que obtener los valores ajustados según el modelo para nuestra distribución de voltaje y comparar el valor esperado con el observado:



El sensor tiene una exactitud aceptable, aunque mejor en los valores extremos de humedad que en los valores centrales

Los aspectos indicados previamente son los más importantes a la hora de elegir un sensor (capacidad del sensor de medir la variable objetivo en el rango de interés y con la exactitud requerida), pero hay otros que definen la fiabilidad de un sensor y que también deben tenerse. La fiabilidad hace referencia a la capacidad de un sensor para adquirir datos bajo determinadas condiciones durante un tiempo establecido (Tabla 1.1). Normalmente se determina como una probabilidad de fallo en un periodo de tiempo o número de usos.

Por ello, debe tenerse en cuenta las siguientes características:

- Vida de almacenamiento. Se refiere al tiempo en el cual el sistema puede estar almacenado en determinadas condiciones sin que cambie sus prestaciones dentro de cierta tolerancia.
- Vida de funcionamiento. Es la mínima cantidad de tiempo en la que el sistema debe funcionar de forma continua o en ciclos *on-off* sin cambiar sus prestaciones dentro de cierta tolerancia.
- Ciclos de vida. Se trata del rango temporal durante el cual el sistema debe funcionar sin cambiar sus prestaciones dentro de cierta tolerancia.
- Estabilidad. Son cambios en las prestaciones del sensor en minutos, horas, días o años.
- Consumo de energía. Es muy importante verificar el consumo de electricidad del sensor y encontrar la opción de menor consumo o la capacidad de recarga cuando se trata de sistemas portables que funcionen con batería.
- Condiciones ambientales en las que se va a instalar el sensor, en particular en sensores de campo que trabajan en condiciones ambientales muy contrastadas (ej., áreas de montaña).
- Tipo y cantidad de acondicionamiento requerido por el sensor. Existen algunos sensores que ya tienen un acondicionamiento integrado (conexión directa); hay otros que requieren un proceso apropiado de acondicionamiento.

Por último, hay que considerar el precio, que puede ser limitante en muchas ocasiones, y que va a determinar el tipo, el número y las características de los sensores que finalmente se puedan utilizar. En la Tabla 1.2 se indican, a modo de ejemplo, las características de un sensor comercial.

### 2.3. Tipos de sensores

Existe una gran variedad de aproximaciones para la clasificación de los sensores, aunque por simplicidad se pueden dividir en:

- Según el aporte de energía
  - Moduladores: precisan una fuente externa de alimentación.
  - Generadores: toman únicamente la energía del medio donde miden.

**Tabla 1.2.** Ejemplo de las características del sensor de humedad relativa HOBO MX2301.

Características
Rango: 0 a 100% HR: -40° a 70 °C; la exposición a condiciones por debajo de -20°C o por encima de 95% HR pueden temporalmente incrementar el error del sensor de humedad en un 1%
Sensibilidad: 46 mV kPa <sup>-1</sup>
Exactitud: <±1,5 %V (0 ~ 85 °C)
Precisión: ±2,5 % desde 10 % a 90 % (típico) hasta un máximo de ±3,5 % incluyendo histéresis a 25 °C; debajo de 10 % HR y sobre 90 % HR ±5 % típico
Resolución: 0,01 %
Corrimiento: <1 % por año típico
Tiempo de respuesta: 15 segundos en aire moviéndose a 1 m sec <sup>-1</sup>
Potencia de transmisión: 1 mW (0 dBm)
Rango de transmisión: Aproximadamente 30,5 m sin obstáculos
Tipo de transmisión: <i>bluetooth</i> Smart (Bluetooth Low Energy, Bluetooth 4.0)
Intervalo de registro: desde 1 segundo hasta 18 horas
Modo de registro: Intervalo fijo (normal, estadísticas) o ráfaga
Precisión del reloj: ±1 minuto por mes de 0° a 50 °C
Tipo de batería: 2/3 AA 3,6 v litio, reemplazables por el usuario
Vida de la batería: típicamente 2 años registrando cada 1 minuto y con el modo de ahorro de energía apagado; típicamente 5 años registrando cada 1 minuto y con el modo de ahorro de energía encendido.
Memoria: 128 KB (63488 mediciones)
Tiempo de descarga de datos: aproximadamente 60 segundos; los tiempos pueden aumentar dependiendo de la distancia al registrador.
Dimensiones de carcasa exterior: 10,8 × 5,08 × 2,24 cm
Diámetro del sensor de temperatura y HR exterior: 1,17 cm
Largo del cable del sensor exterior: 2 m
Peso: 75,5 g
Materiales: acetal, junta de silicona, tornillos de acero inoxidable
Certificación CE: este producto cumple con todas las directivas relevantes de la Unión Europea (UE). Este equipo ha sido probado y cumple con los límites para un dispositivo digital de Clase B, de conformidad con la parte 15 de las reglas de la FCC.
Rango de medida: 15 ~ 115 kPa Señal de salida: 0,2 ~ 4,8 V (0 ~ 85 °C)
Consumo típico: 7mA Voltaje de alimentación: 4,85 ~ 5,35 V

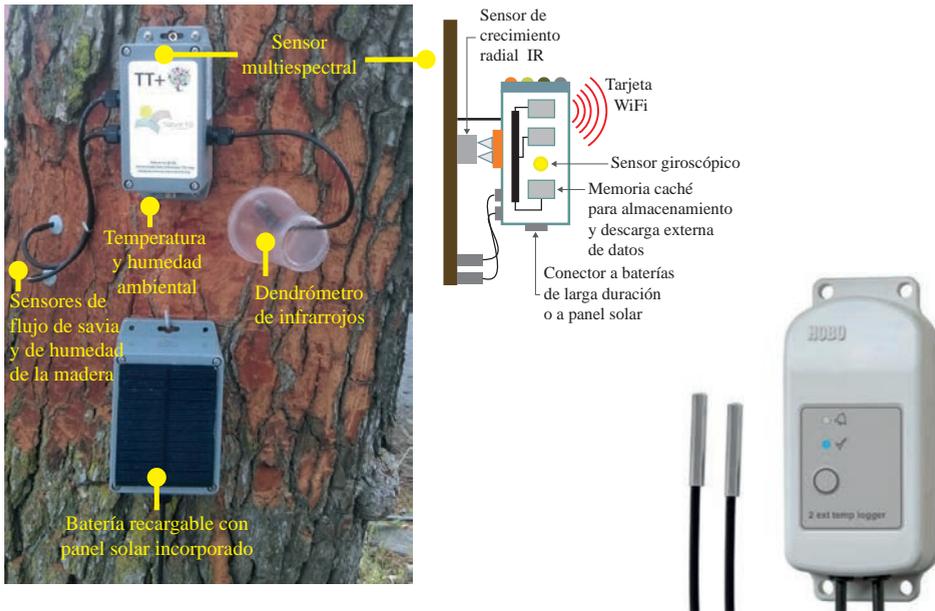
- Según la señal de salida
  - Analógicos: la salida varía de forma continua. Normalmente la información se basa en la amplitud. Cuando la información se basa en la frecuencia se denominan “cuasi-digitales”.
  - Digitales: la salida varía en pasos discretos.
- Según el modo de funcionamiento
  - Deflexión: la magnitud medida genera un efecto físico (deflexión).
  - Comparación: se intenta mantener nula la deflexión mediante la aplicación de un efecto opuesto al generado por la magnitud medida.
- Según la relación entrada-salida:
  - orden cero
  - 1<sup>er</sup> orden
  - 2<sup>do</sup> orden
- Según el principio físico:
  - resistivo
  - capacitivo
  - inductivo
  - termoelectrónico
  - piezoeléctrico
- Según la magnitud medida:
  - temperatura
  - presión
  - aceleración
  - pH
  - (otras variables)
- Según su posición en el equipo:
  - sensores externos
  - sensores internos

En el caso de que hablemos de equipos de sensorización, éstos pueden clasificarse en:

- Modelos con sensores incorporados (sensores internos) (por ej., temperatura y humedad relativa; Figura 1.7a).
- Modelos con puertos en los que se pueden yuxtaponer varios sensores (Figura 1.7a).

A continuación, se debe seleccionar qué tipo de sensores se pueden instalar al *data logger*:

- Específico: diseñado para un tipo particular de sensores. De esta forma, el usuario sólo tiene que programar los criterios de adquisición de datos, ya que el *data logger* está programado previamente (Figura 1.7b).
- No específicos: En este caso, el usuario debe programar los sensores para la conversión de los datos en los diferentes puertos del *data logger*. Un ejemplo frecuente son las estaciones meteorológicas, que suelen incluir varios puertos que permiten conectar diferentes sensores (por ej., luz, temperatura, humedad, etc.). En otros casos, el *data logger* es capaz de detectar el tipo de sensor conectado y se programa para transformar la señal.



**Figura 1.7.** Equipos de sensorización, colectores de datos y sensores: equipo de monitorización de arbolado TreeTalker® TT+ de Nature 4.0 ® que incluye sensores internos (temperatura y humedad relativa del aire, fotodiodos para transmitancia de copa, sensor capacitivo para densidad de la madera) y sensores externos (de flujo de savia, dendrómetro de infrarrojos) (izq.); colector de datos HOBO® modelo “MX2303” Outdoor con 2 canales para sensores de temperatura externos consistentes de termistores encapsulados en acero inoxidable (inf. dcha.).

## 2.4. Almacenamiento y programación

En los procesos de sensorización, los datos quedan almacenados típicamente en un dispositivo electrónico de registro o *data logger*, que es un grabador independiente o integrado en el sensor y que registra los datos de las variables de interés en tiempo real (ya sea la señal eléctrica –ej., voltaje–, o la variable final –ej., temperatura –). Los *data logger* son uno de los instrumentos más importantes de un trabajo de sensorización, ya

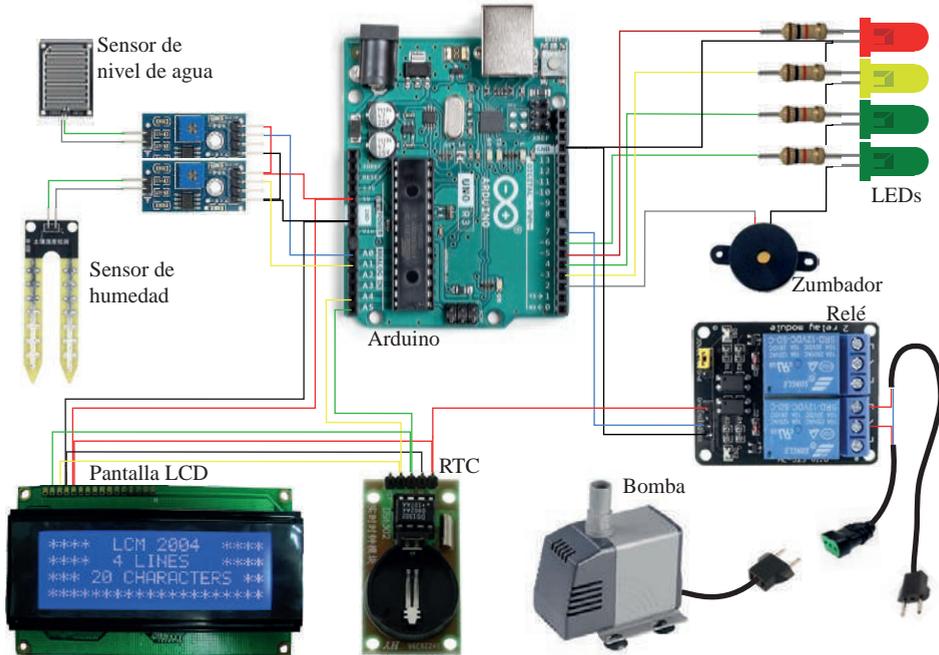
que deben grabar miles de datos durante períodos prolongados de tiempo (meses o años), y en condiciones frecuentemente hostiles (al menos cuando se trabaja en condiciones de campo). Un *data logger* está definido por: i) la frecuencia de muestreo, ii) el/los tipos de entrada, iii) el número de canales, iv) el tipo de almacenamiento de datos, v) el tiempo de grabación, vi) el interfaz de usuario, vii) la fuente de energía, y viii) el precio.

En la actualidad, muchos equipos de sensorización ya están diseñados para que el *data logger* reconozca automáticamente los sensores, mientras que los programas específicos de comunicación facilitan la programación general de la toma y tratamiento de datos. Por ejemplo, los equipos TreeTalker® comercializa equipos de sensorización con un determinado número de sensores (<https://www.nature4shop.com/>) que disponen de un *software* de registro, almacenamiento, preprocesado y transmisión que facilita la programación. Para ello, cuentan con librerías de sensores con los parámetros adecuados de transformación de datos y llevan al usuario por una serie de preguntas en relación con la tasa de toma de datos y el manejo de los mismos. Otro ejemplo es el modelo CR1000X de Campbell (<https://www.campbellsci.es/cr1000x>), que permite integrar varios sensores en condiciones extremas y ofrece una alta fiabilidad. Este *data logger*, al igual que otros equipos similares, mide las señales de los sensores seleccionados, controla las telecomunicaciones, analiza los datos, controla dispositivos externos y almacena datos y programas en su propia memoria en lenguaje de programación CRBasic o a través del programa PC200W; este último permite al usuario conectarse directamente con el *data logger*, generar nuevos programas y grabarlos en su memoria. En otros casos, se usan plataformas abiertas, con *software* de licencia pública (por ej., Arduino; Figuras 1.8 y 1.9).

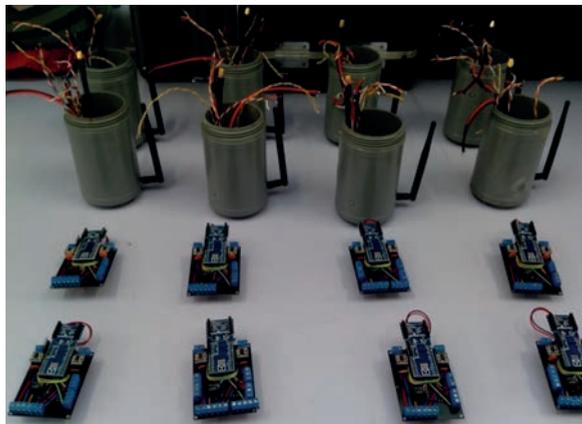
Un problema importante cuando se trabaja en sensorización en el medio natural, en particular en áreas forestales, es el modo de comunicación de los distintos sensores entre sí y del módulo central con la señal telefónica para el envío de los datos (en caso de estar diseñados con esta opción). Muchos de los *data logger* comercializados indican el procedimiento más adecuado cuando se accede por primera vez a este tipo de sistemas.

### 3. Colectores de datos

La recopilación, almacenamiento y análisis de datos de sensores es uno de los aspectos más importantes para la investigación en campo. Una eficiente monitorización de las variables ecofisiológicas demanda, en primer lugar, poseer unos conocimientos sólidos para entender el funcionamiento de las plantas en el escenario de condiciones ecológicas específico donde se desarrollan y, en segundo lugar, controlar la instrumentación necesaria para extraer las fluctuaciones y respuestas en forma de datos reflejados por las variables que nos marcan dicha dinámica. Los resultados o datos deben tener una estructura y un flujo lo más consistentes posible en el momento de su adquisición, para agilizar su procesado y posterior interpretación según los objetivos marcados.



**Figura 1.8.** Uso de plataformas abiertas con *software* de licencia pública GPL Arduino. El esquema representa la instalación de dos sensores, uno de humedad y otro de nivel de agua, para controlar el riego automático mediante una bomba acoplada a un relé.



**Figura 1.9.** Detalle de controladores de equipos de sensorización basados en plataforma Arduino. Los microcontroladores llevan acoplado un módulo de comunicación inalámbrica para comunicarse con un equipo que actúa como coordinador, recibiendo la información de los diferentes controladores, almacenándola en una tarjeta de memoria y enviándola a un dispositivo electrónico remoto a través de línea telefónica.

Los colectores de datos son dispositivos que permiten a los usuarios capturar y registrar información sobre un entorno o proceso específico, a menudo de forma remota, durante un periodo de tiempo prolongado, utilizándose con una mayor frecuencia en aplicaciones en las que se deben tomar mediciones críticas de manera regular y consistente. Inicialmente los podríamos clasificar por sus características según sean fijos o móviles, y estos, a su vez, según el tipo de integración con los recopiladores de información, sensores o instrumentos de detección similares que han sido calibrados para ser sensibles a ciertos estímulos ambientales. Estos sensores pueden integrarse directamente en el dispositivo como componentes internos fijos o conectarse externamente cuando sea necesario. Según el fabricante y el modelo, el colector puede ser diseñado con ambas posibilidades (Figura 1.10).



**Figura 1.10.** Ejemplos de almacenadores de datos: con sensores internos (*data logger* TG-4100 de Tinytag con sensor de temperatura del agua) (izq.); con sensores mixtos (*data logger* Tinytag TGP-4204 con sensor interno de temperatura y sensor externo PR1000) (centro); con sensores externos (*data logger* MSR255 que permite la medición simultánea de hasta 5 variables diferentes) (dcha.).

La gran mayoría de estos registradores son dispositivos que se alimentan de una batería para su funcionamiento, siendo compactas y altamente portátiles, convirtiéndose en un elemento clave en la adquisición de datos. Los almacenadores de datos con sensores externos pueden estar o no diseñados para conectarse a un tipo y modelo de sensor según sea la transformación de la señal directa (colectores específicos) o indirecta; es decir, si están o no preconfigurados con un programa previo de transformación de la señal. En éstos últimos, es el usuario el intermediario entre la toma y la transformación de la señal según la lectura de dato requerida (Figura 1.11).

Los colectores de datos pueden interactuar con una computadora y usar *software* para el análisis y la visualización de los datos recopilados, usarse como un dispositivo independiente con una interfaz local o conectarse de forma inalámbrica a un dispositivo en remoto. La amplia gama de registradores existente incluye desde registradores de función fija de un solo canal simples y económicos, hasta dispositivos programables más potentes capaces de manejar cientos de canales.



**Figura 1.11.** Colectores de datos no específicos: Omega X series multi-channel Thermocouple data loggers (izq.); CR6 y CR100X data loggers de Campbell Scientific Inc.(dcha.).

### 3.1. Capacidad de almacenamiento de datos

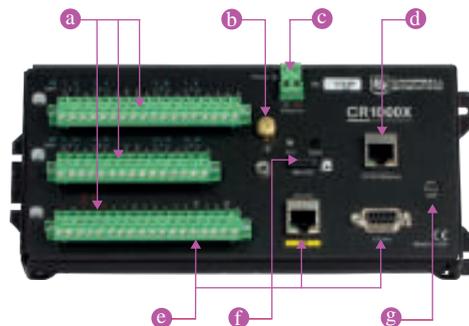
Los registradores de datos utilizan un microprocesador, es decir una memoria interna que opera para el almacenamiento de datos. La duración del almacenamiento es el parámetro más relevante asociado a los colectores de datos y se define como el tiempo durante el cual el colector será capaz de almacenar datos recibidos de los equipos y sensores antes de alcanzar su capacidad de memoria. Este parámetro está directamente ligado a la capacidad de memoria del registrador de datos, al número de canales utilizados, al tipo de señal recibida y a la frecuencia de muestreo requerido por el estudio o trabajo.

Para determinar la duración del recopilado de datos, simplemente hay que dividir la capacidad de la memoria (número de registros que el dispositivo puede grabar/almacenar) por la frecuencia de muestreo. Por ejemplo, si se dispone de un registrador de datos que puede almacenar hasta 50000 líneas de datos o “muestras” de los equipos y sensores que se han conectado a un canal y se desea registrar 4 medidas cada minuto, el registrador de datos puede operar durante  $50000/4 = 12500$  minutos, es decir alrededor de 8,7 días. Por el contrario, si se quiere saber la capacidad de almacenamiento necesaria para que el colector de datos recopile información durante 1 año, registrando 2 voltajes a 1 Hz de pulso, se debe conocer el volumen de memoria ocupado por cada registro o “muestra”. Por ejemplo, suponiendo que cada registro se correspondiera con 16 bits o 2 bytes por cada segundo de procesado en el sistema binario, se requeriría almacenar  $31.536.000 \text{ registros año}^{-1}$  ( $= 1 \text{ registro s}^{-1} \times 86400 \text{ s día}^{-1} \times 365 \text{ día año}^{-1}$ ). A su vez, asumiendo 16 bits de intensidad de corriente continua en 2 canales:  $16 \text{ bits} / 10^{-6} \text{ Mb} \times 2 \text{ canales} \times 31.536.000 \approx 1010 \text{ Mb} \approx 127 \text{ MB}$  sería la capacidad de almacenamiento requerida para el colector de datos.

### 3.2. Principales componentes de los colectores de datos

Para ilustrar los componentes básicos de un colector de datos, se ha elegido el modelo CR1000X de Campbell Scientific (Figura 1.12). La parte más relevante de un colector de datos genérico no específico es el panel de cableado, donde se realizan las diferentes conexiones del colector con los equipos y la fuente de alimentación. Los principales componentes del panel de cableado de un colector genérico son:

- **Terminales de conexión de sensores.** Estos terminales permiten que el registrador de datos mida, se comunique y alimente los sensores conectados. Para que un registrador de datos interprete la señal del sensor, la señal de salida de éste debe ser compatible con el terminal de entrada del registrador de datos al que está conectado. Dependiendo de la complejidad de su sistema de adquisición de datos, puede contener los siguientes tipos de terminales:
  - Entradas analógicas: incluyen entradas de voltaje y corriente. Se pueden configurar para tomar mediciones de un solo extremo, midiendo el voltaje de entrada con respecto a la toma de tierra, o medidas diferenciales, midiéndose éstas entre dos entradas. Algunos sensores analógicos son los sensores de radiación solar, los de nivel, etapa y flujo de fluidos, los contadores de pulsos y los sensores de temperatura y humedad relativa, entre otros.
  - Contadores de pulsos: utilizados para registrar la cantidad de veces que ocurre algo. Estos contadores suman el número de conteos en cada ejecución, lo que permite determinar variables como la velocidad, el flujo y la intensidad de lluvia. Como ejemplos, se puede mencionar a los sensores mecánicos de velocidad del viento, los pluviómetros de cubetas basculantes (*tipping bucket*) y los medidores de flujo.
  - Salidas de excitación de voltaje conmutado: proporcionan excitación de voltaje programable para mediciones de puentes resistivos. Se pueden configurar para suministrar una fuente de alimentación de 3,3 o 5V de corriente continua para alimentar sensores o alternar líneas de control.



**Figura 1.12.** Colector de datos (*Data logger*) CR1000X Campbell Scientific, Inc. y sus principales componentes: a) terminales de conexión de sensores, b) clavija de toma de tierra, c) conector de alimentación, d) puerto de comunicación Ethernet, e) puertos multiusos, f) puerto para memoria externa, tarjeta de memoria, y g) puerto de comunicaciones micro USB.

- Puertos I/O digitales (entrada y salida): están configurados como entradas binarias para realizar funciones como la detección de estado o la lectura de periféricos de expansión de medición. Se puede programar individualmente cada puerto como una salida de control para un dispositivo externo.
- Puertos de comunicación: utilizados para permitir la transferencia de datos entre su registrador de datos y varios sensores inteligentes, siendo los protocolos utilizados RS-232, RS-485 o SDI-12.
- Terminales continuos de 5V/12V: son fuentes de alimentación reguladas para sus sensores y otros dispositivos periféricos. En el caso de 12V conmutados, sólo requieren energía durante las mediciones.
- **Clavija de tierra.** Esta lengüeta de tierra conecta el registrador de datos a tierra como medida de protección de los rayos cercanos, al desviar los voltajes transitorios lejos de la electrónica. Protege, al mismo tiempo, de descargas electroestáticas y ayuda a asegurar mediciones analógicas libres de ruidos.
- **Conector de alimentación.** Proporciona terminales para conectar el registrador de datos a los cables de su fuente de alimentación. Este conector se utiliza, principalmente, para conectar baterías de 12V, aunque también se pueden conectar fuentes de carga de hasta 32V CC, como un convertidor de energía o panel solar.
- **Puerto Ethernet.** Normalmente se utiliza para comunicaciones IP con el *software* específico según el tipo de registrador y/o fabricante. También se puede conectar a una cámara o sensor habilitado para Ethernet.
- **Puertos de usos múltiples.** Sirven para conectar el registrador de datos a sensores inteligentes que presentan componentes internos de medición y procesamiento, dispositivos de comunicación, como módems de radio o celulares y periféricos de expansión de medición.
- **Puerto de tarjeta de memoria.** Este tipo de puerto permite guardar la memoria interna del registrador en una tarjeta o microtarjeta, pudiéndose transportar fácilmente hacia otro tipo de dispositivo donde poder visualizar, procesar y analizar los datos almacenados.
- **Puerto Micro USB.** Se utiliza para programación y pruebas del registrador de datos. De manera paralela y en ausencia de fuente de alimentación externa, este puerto puede suministrar energía de 5V al registrador de datos, suficiente para la configuración y algunas de las mediciones. Igualmente se puede utilizar la transmisión remota de datos la conexión inalámbrica o Ethernet no son factibles.

Algunos elementos, como el puerto USB o la ranura para memoria externa, pueden variar dependiendo del fabricante o entre modelos, pero estos elementos suelen estar presentes, de una u otra forma, en la mayoría de los colectores.

## 4. Principios de funcionamiento de algunos sensores frecuentes en el campo de la ecofisiología vegetal

Las variables ambientales afectan la composición, la estructura, el crecimiento, la salud y la dinámica de los ecosistemas forestales. Por ello, la medición de datos meteorológicos es fundamental para la interpretación de los procesos ecofisiológicos. En este contexto, los principales objetivos de la sensorización para el seguimiento ecofisiológico en masas forestales son:

- recopilar datos para describir las condiciones ambientales y caracterizar la disponibilidad de los recursos primarios para el crecimiento y desarrollo de las plantas;
- caracterizar la relación de las condiciones ambientales con el estado del ecosistema;
- identificar e investigar índices y factores de estrés para las masas vegetales de las zonas a estudiar, como condiciones y eventos climáticos extremos (por ejemplo, heladas, calor, sequía, tormentas e inundaciones);
- construir series de datos temporales continuas en largos periodos que cumplan con los requisitos de análisis adicionales (estadísticas y modelos) de las respuestas de los ecosistemas en condiciones ambientales reales y cambiantes (por ejemplo, cálculos del balance hídrico, disponibilidad de agua para el rodal, crecimiento, ciclo de nutrientes), así como efectuar evaluaciones integradas en varios aspectos de las parcelas bajo estudio (por ejemplo, evaluación de la condición de la copa, deposición de contaminantes atmosféricos, incremento, fijación de carbono).

Se describen a continuación, por grupos de variables, los principales dispositivos disponibles en el mercado.

### 4.1. Micrometeorología

La magnitud y los cambios en el tiempo de las variables meteorológicas deben evaluarse con la mayor precisión posible para poder utilizar los datos meteorológicos como factores explicativos. Los datos de las estaciones meteorológicas nacionales no son suficientes, en la mayoría de los casos, para representar las características de áreas boscosas. Las características geográficas abruptas de muchas zonas dedicadas a uso forestal afectan al flujo de aire y limitan la representatividad de los datos meteorológicos por la heterogeneidad espacial (por ejemplo, ubicación, altitud, exposición, pendiente). Por ello, dentro del área forestal, el control meteorológico en zonas específicas a estudiar proporciona información local sobre los factores básicos que influyen en los ecosistemas forestales. Los datos meteorológicos se utilizan para derivar los flujos y la deposición de contaminantes atmosféricos en las masas forestales, así como los ciclos del agua y de los elementos, la vitalidad, el crecimiento y la fenología y el estado de las copas de los árboles.

Existe una amplia gama de sensores capaces de controlar todas las variables meteorológicas a través de un único controlador con tecnología de medición de vanguardia con un registrador de datos incorporado, que almacena las mediciones en una memoria no volátil a prueba de errores. Estos equipos incorporan, en su mayoría, pantallas LCD que verifican las condiciones actuales y las lecturas históricas que pueden ser transferidas remotamente a través de diferentes líneas de comunicación inalámbricas. A modo de ejemplo, en la Figura 1.13 se muestra una estación completa del fabricante Spectrum Technologies WatchDog®. Esta estación cuenta con 10 dispositivos diferentes, incluidos sensores para monitorizar la dirección y velocidad del viento, la precipitación, la humedad relativa y la temperatura del aire, la radiación incidente y la presión barométrica; sus características principales se recogen en la Tabla 1.3.



**Figura 1.13.** Microestación meteorológica WatchDog de Spectrum Technologies con 4 puertos externos y principales componentes (ver especificaciones en la Tabla 1.3).

**Tabla 1.3.** Principales especificaciones técnicas de los componentes de estaciones meteorológicas.

Parámetro de medición	Rango de medición	Precisión	Unidades por registrador	Altura o profundidad de medición (m)
<b>Velocidad del viento</b>	0-280 km/h	±5 %	1	+4
<b>Dirección del viento</b>	2º incremento	± 7º	1	+4
<b>Precipitación</b>	0,01 pulgadas (0,25 cm)	±2 %	1	+1,5
<b>Temperatura del aire</b>	-40 a 100 °C	±0,7 °C	1	+1,5
<b>Humedad relativa (punto de rocío)</b>	20 a 100 %	±3 %	1	+1,5
	5 a 50 °C	±2 °C	1	
	-73 a 60 °C			
<b>Temperatura del suelo</b>	-40 a 100 °C	±0,7 °C	4	-0,5
<b>Radiación solar</b>	1-1250 W m <sup>-2</sup>	±5 %	2	+1
<b>Radiación PAR o quantum</b>	0-2500 μmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	±5 %	2	+1
<b>Presión barométrica</b>	880-1080 hPa	±1.7 hPa	1	+1

## 4.2. Mediciones del estado de energía del suelo: contenido volumétrico de agua y temperatura del suelo, potencial de agua y tensiómetros.

El contenido y la capacidad de retención de agua es una de las características que influye de manera determinante en la fertilidad del suelo. El contenido volumétrico varía temporal y espacialmente y se relaciona directamente con la disponibilidad de agua para las plantas y con otras variables fisiológicas, como los potenciales hídricos y la transpiración.

Existen en el mercado multitud de instrumentos capaces de medir los flujos de agua en el suelo, el estado de energía o potencial de agua en el suelo (Figura 1.14 y Tabla 1.4), aunque básicamente se pueden agrupar en 4 tipos según su principio de funcionamiento:

- Tensiómetros. Son sensores de tipo mecánico que miden el déficit de presión en un tubo lleno de agua, producido por la absorción de dicha agua por el suelo a través de una matriz porosa.
- De conductividad y resistivos. Miden las propiedades de la corriente eléctrica al pasar a través del suelo y la relacionan con la cantidad de agua. La medida es indirecta y requiere calibración. Los más comunes son los tipos TDR (*Time Domain Reflectometry*).
- Capacitivos. Se basan en las propiedades de los condensadores, midiendo la intensidad del campo dieléctrico entre la sonda y el suelo.
- De pulso de calor. Tienen un funcionamiento similar a las sondas de flujo de savia de pulso de calor. El más simple consiste en dos sondas paralelas; una de ellas emite un pulso de calor y otra registra la velocidad e intensidad con la que se transmite dicho pulso por el suelo.



**Figura 1.14.** Ejemplos de sensores de variables de estado de energía del suelo: sensores HOBOTM de contenido volumétrico de agua (S-SMC-M005) (sup. izq.) y de temperatura del suelo (S-TMB-M002) (inf. izq.), que se conectan al *data logger* mediante un puerto USB; sensor inalámbrico HOBORXW Teros 21 de potencial de agua en el suelo y temperatura; tensiómetro 64xx series de SpectrumTechnologies (dcha.) (ver especificaciones técnicas en la Tabla 1.4).

Los tensiómetros (Figura 1.14. dcha.) se colocan en campo con la copa de cerámica firmemente en contacto con el suelo en la zona de raíces de la planta. La taza de cerámica es porosa para que el agua pueda moverse a través de ella y equilibrarse con el agua

del suelo, creándose un vacío parcial a medida que el agua se mueve desde el tubo del tensiómetro sellado. El vacío provoca una lectura en el indicador de vacío resultando en una indicación directa de las fuerzas de atracción entre el agua y las partículas del suelo. A medida que el suelo pierde humedad (se seca), el potencial hídrico disminuye (aumenta la tensión) y aumenta la lectura del vacuómetro (tensiómetro). Por el contrario, cuando llueve el contenido de agua del suelo aumenta, disminuyendo la tensión y reduciendo la lectura del indicador de vacío. De esta forma, un tensiómetro registra continuamente las fluctuaciones del potencial hídrico del suelo en condiciones de campo.

**Tabla 1.4.** Principales especificaciones técnicas de los medidores de estados de energía del suelo.

Sensor	Rango de medición	Precisión	Unidades por registrador	Altura o profundidad de medición (m)
S-SMC-M005	0 a 0,55 m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> a 0 a 50 °C	±3 % ±2 %	4	-(0,25 – 1)
S-TMB-M002	-40 a 100 °C	±0.2 %	4	-(0,25 – 1)
TEROS 21	-2000 a -9 kPa	±10 %	independiente	-(0,25 – 0,5)
Tensiómetro	0 a 850 hPa	±2 %	independiente	-(0,25 – 0,5)

### 4.3. Sensores de mediciones fisiológicas

La interacción de los procesos y mecanismos fisiológicos de las plantas bajo el dominio de factores ambientales es una disciplina experimental básica que debemos conocer para entender el funcionamiento de las plantas. Se pueden identificar algunos parámetros básicos del funcionamiento biológico de las plantas que describen con precisión su estado fisiológico; estos parámetros, conocidos como parámetros fisiológicos, pueden ser relacionados con parámetros medibles a través de sensores. Entre ellos, destacan cuatro, que suelen medirse con frecuencia con la ayuda de sensores:

- **Transpiración.** Es la tasa de evaporación de agua desde los tejidos fotosintéticos. Está regulada por la apertura estomática y las condiciones ambientales (principalmente temperatura y humedad relativa del aire). Se relaciona con la fotosíntesis y, en general, con la fisiología de las plantas por ser uno de los mecanismos que regula el potencial hídrico (debido al déficit de vapor que genera en las hojas) y la presencia de agua y CO<sub>2</sub> en el interior de las hojas (debido a la apertura estomática). Se estima de forma indirecta a través de la medida de flujo de savia, para lo que se utilizan diferentes tipos de sondas, como las sondas Granier.
- **Potencial hídrico.** Es la presión equivalente de la columna de agua en los tejidos conductores de la planta que permite el movimiento del agua de las raíces a las hojas. Se mide con la cámara de Scholander. Este equipo suele usarse con la misma frecuencia y bajo las mismas condiciones que los equipos de medida de fotosíntesis; normalmente, no suelen tener conexión con colectores de datos.

- **Fotosíntesis neta.** Es la tasa de intercambio gaseoso, medida como la cantidad de  $\text{CO}_2$  fijada en el proceso fotosintético. Es la principal actividad metabólica de la planta, altamente sensible a estados alterados como consecuencia de la presión de factores de estrés biótico o abiótico. Se estima a través de la diferencia de concentración de  $\text{CO}_2$  y agua en un circuito cerrado de gases con analizadores de infrarrojos (IRGAs). Estos equipos requieren un grado de atención elevado, por lo que no suelen formar parte de instalaciones autónomas y se utilizan en campañas de medidas puntuales.
- **Crecimiento radial.** Se trata de la variación del diámetro del árbol a una altura determinada. Se estima con un dendrómetro.

Estas medidas suelen, además, completarse con otro tipo de medidas estructurales que aportan información adicional y mejoran la interpretación de las variables con respecto al estado de la vegetación, especialmente las relacionadas con el índice de área foliar (LAI).

### Medida de la velocidad y flujo de savia

El flujo de savia es sinónimo de movimiento de agua en las plantas (aunque el fluido en el tallo no es agua pura sino savia). En plantas leñosas, el flujo de savia se mide con un sensor en la albura (no debe confundirse con la savia elaborada que circula por el floema de las plantas).

El flujo de savia también es sinónimo de transpiración y, ocasionalmente, de evapotranspiración (ETo). Sin embargo, el flujo de savia no es estrictamente transpiración ni evapotranspiración, sino el movimiento del fluido dentro de las plantas (la transpiración es la pérdida de agua de la planta en forma de vapor de agua, y la evapotranspiración es la transpiración más la evaporación del agua de otras superficies, particularmente del suelo). La savia contiene otros elementos, como nutrientes y hormonas, por lo que sus características no son exactamente las del agua pura. Sin embargo, la medición del flujo de savia y la estimación del uso total de agua de la planta se considera, a menudo, una aproximación cercana a la transpiración una vez que se han incluido los factores de corrección apropiados en su cálculo. Cualquier movimiento ascendente de la savia, desde la raíz a las hojas, se relaciona con la transpiración de agua en las partes verdes y con el déficit de vapor que genera, lo que se traduce en un potencial hídrico negativo en la hoja y el movimiento del agua desde las partes de la planta con potenciales hídricos mayores.

La transpiración de una planta se puede medir a nivel del árbol completo. Según la teoría de la conducción y la convección del calor, la velocidad de la corriente de transpiración en el tronco de un árbol se puede estimar a partir del transporte (de la transmisión) de un pulso de calor que se aplica al tallo en un punto. El movimiento del pulso de calor se rastrea a través del árbol. Dependiendo de cómo se aplique el calor, los sensores de flujo de savia se pueden clasificar en dos grupos principales: i) pulso de calor (ver un ejemplo de este tipo de sensor en la Figura 1.15 y Tabla 1.5), y ii) calentamiento continuo.



**Figura 1.15.** Sistema de medición flujo de savia aplicando método de pulso de calor: sensor SFM1 de ICT International Ltd. (ver especificaciones en la Tabla 1.5).

**Tabla 1.5.** Principales especificaciones del medidor de flujo de savia SFM1.

Rango de medición	Rango de T <sup>a</sup> y HR	Resolución	Precisión	Duración medida	Pulso de calor/duración
-100 a 100 cm h <sup>-1</sup>	-10 a 50 °C 0-99 %	0,01 cm h <sup>-1</sup>	0,5 cm h <sup>-1</sup>	120 seg	20 julios (max 40 julios) 3 min (10 min recomendado)

• **Sensores de pulso de calor (HPV)**

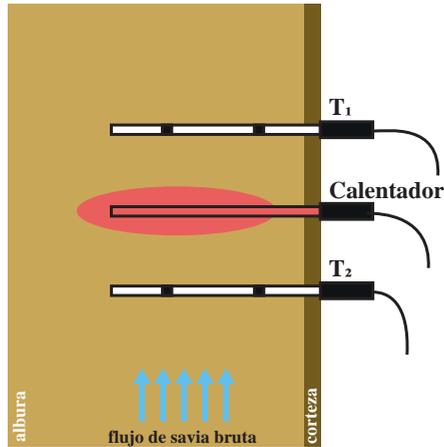
Para medir el flujo de savia se requiere medir la velocidad del calor ( $V_h$ , cm h<sup>-1</sup>) monitoreando la tasa de cambio en la temperatura del pulso de calor. El modo de funcionamiento de este tipo de sensores es el siguiente: el pulso de calor es emitido por una sonda (calentador) que se inserta en el vástago; posteriormente, la temperatura se controla mediante otras dos sondas (denominadas sondas de termistor, T<sub>1</sub> y T<sub>2</sub> en la Figura 1.16); finalmente, se realizan una serie de correcciones y cálculos para convertir el  $V_h$  observado (cm h<sup>-1</sup>) en flujo de savia (kg h<sup>-1</sup>). Dentro de la familia de métodos de pulso de calor, las dos técnicas más practicadas son: el método T-max y el método de relación de calor.

◦ **Método T-max**

Mediante la aplicación de este método, se busca el tiempo que tarda en observarse el aumento máximo de temperatura (T<sub>max</sub>) en las sondas que se instalan en la dirección del flujo (vertical ascendente) respecto de la sonda calentada (T<sub>1</sub>, Figura 1.16).

La velocidad de calor ( $V_h$ , cm h<sup>-1</sup>) es función de T<sub>max</sub> y se puede determinar mediante la siguiente expresión matemática:

$$V_h = (((\sqrt{x^2 - 4k T_{max}}) / T_{max}) \times 3600 \tag{1}$$



**Figura 1.16.** Ilustración de la técnica de flujo de savia (método de propagación de pulso de calor). La sonda del calentador (en rojo) se inserta en el vástago y se instalan dos sondas adicionales ( $T_1$  y  $T_2$ ) equidistantes de la sonda del calentador. El elipsoide rojo simboliza el campo de calor después de que se aplica al tallo un pulso de calor de una intensidad determinada.

Donde  $x$  es la distancia (cm) entre  $T_1$  y el calentador,  $k$  es un parámetro clave que define la difusividad térmica ( $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ ) de la albura y  $T_{max}$  (s) es el tiempo necesario para alcanzar el máximo aumento de la temperatura  $T_1$ .

Inevitablemente, la instalación de las sondas en el vástago provoca que la albura se contraiga, obstruyendo parcialmente el flujo natural de los fluidos. Los efectos derivados de la herida ocasionada se corrigen aplicación la siguiente expresión:

$$V_c = a + b V_h + c V_h^2 \quad [2]$$

Donde  $a$ ,  $b$ , y  $c$  son coeficientes empíricos determinados en función de los tamaños de las sondas y la anchura de la herida. Finalmente,  $V_c$  se convierte en flujo de savia ( $Q$ ,  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-2} \text{h}^{-1}$ ), pudiéndose representar como un flujo volumétrico ( $\text{kg h}^{-1}$ ) una vez considerada el área de la albura (A):

$$Q = ((V_c \rho_d (c_d + m_c c_w)) / (\rho_w c_w)) \times 3600 \quad [3]$$

Donde  $\rho_d$  y  $\rho_w$  son la densidad ( $\text{kg m}^{-3}$ ) de la albura seca y del agua, respectivamente;  $c_d$  y  $c_w$  son la capacidad calorífica específica ( $\text{J kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$ ) de la matriz de madera seca y la solución de savia, respectivamente; y  $m_c$  es el contenido de humedad de la albura ( $\text{kg kg}^{-1}$ ).

#### ◦ Método de relación de calor

Este método calcula  $V_h$  a partir de la relación entre el aumento de temperatura de la sonda del termistor superior ( $T_1$ ) y la sonda inferior ( $T_2$ ). Normalmente, esta relación se calcula

como la media de varias relaciones ( $\Delta T_1/\Delta T_2$ ) medidas entre 60 y 100 s después de cada pulso de calor, estimada a partir de la de la expresión:

$$V_h = (k/x) \delta T \times 3600 \quad [4]$$

Donde  $k$  es la difusividad térmica ( $\text{cm s}^{-1}$ ),  $x$  es la distancia (cm) entre el calentador y los termistores y  $\delta T$  es el  $\ln(\Delta T_1/\Delta T_2)$ , siendo  $\Delta T_1$  y  $\Delta T_2$  el aumento de temperatura en  $T_1$  y  $T_2$ , respectivamente.

Similar al método Tmax, las ecuaciones 2 y 3 se utilizan para tener en cuenta las heridas y estimar con precisión un flujo volumétrico.

- **Sensores de calor continuo**

En este tipo se distinguen: los sensores de calor continuo con disipación técnica (TDP) o método de Granier, que se describe a continuación, y los sensores que siguen el método de equilibrio térmico del vástago.

- **Método de Granier**

Los sensores de disipación térmica o método de Granier se componen de dos sondas (agujas) idénticas de aproximadamente 1 mm de diámetro y 20-50 mm de longitud. Cada sonda contiene una termocupla de aleación de cobre (Tipo T) y una espiral de resistencia que crea una zona de calentamiento de 10-30 mm de largo. La diferencia de temperatura entre las dos sondas del sensor es transmitida a través de la señal producida por la conexión de ambas termocuplas. Las dos sondas son instaladas en el tronco o la rama; la superior a, aproximadamente, 10 cm de la inferior. Las sondas son insertadas en la albura dentro de tubitos de aluminio.

La sonda superior es calentada con una corriente constante que generalmente oscila en torno a 0,2 vatios (W) de potencia. La sonda inferior es la sonda de referencia, ya que no es calentada y se mantiene a la temperatura del leño. El sistema registra la diferencia de temperatura entre las dos termocuplas (dT). La velocidad del flujo de savia marca la diferencia de temperatura entre las dos sondas. Cuando no hay flujo de savia durante la noche toda la energía es disipada por conducción en el leño y se produce un máximo de dT (Figura 1.17). Ocurre lo contrario en torno al mediodía, cuando la savia circula por la albura, dT disminuye porque la sonda calentada es enfriada por la fracción de calor disipado por convección (Granier, 1985). Es en este momento cuando se produce el máximo movimiento de flujo de savia en la planta.

### **Medida del potencial hídrico en la planta (cámara de Scholander)**

A través de uso de este instrumento se puede conocer el estado hídrico de la planta. El potencial hídrico es la característica física que define la tendencia del agua a trasladarse de un punto a otro dentro de la planta (de los mayores valores de potencial a los menores). Se mide en megapascales (MPa) y se relaciona con la disponibilidad hídrica en el suelo (a mayor contenido de agua, mayor diferencia de potencial entre las raíces y las hojas), con

las condiciones ambientales (una mayor temperatura y menor humedad relativa del aire y la acción del viento favorecen una mayor transpiración y, por lo tanto, aumentan el potencial hídrico) y con el funcionamiento biológico de las plantas (como las estrategias de captación de agua; así, las plantas isohídricas cierran estomas y mantienen el potencial cuando la disponibilidad de agua es reducida, mientras que las anisohídricas tienen la estrategia de aumentar la transpiración y elevar la diferencia de potencial entre la raíz y las hojas para aumentar la capacidad de absorción de agua por las raíces (Quero *et al.*, 2011)).

Para medir el potencial hídrico se utiliza la cámara de Scholander, cuyo principio consiste en introducir la hoja o ramillo a medir en una cámara donde se aumenta la presión bombeando un gas inerte, hasta que la presión en la cámara iguala la presión negativa en la hoja, momento en el que la savia del xilema comienza a fluir en sentido contrario, observándose su salida por el extremo del tallo o peciolo (Figura 1.18).

Se puede definir el potencial hídrico en la planta en una serie de momentos a lo largo del día. Idealmente, se toma la primera medida antes del amanecer (potencial en *pre-dawn*), momento en el que la presión se encuentra más relacionada con la disponibilidad de agua en el suelo. Se recomienda repetir el proceso cada cuatro horas hasta la puesta de sol y en diferentes estaciones para estimar fluctuaciones bajo distintos regímenes de temperatura, precipitación y humedad relativa.



**Figura 1.18.** Esquema de una bomba de Scholander (izq.); cámara modelo SEC-3115P40G4V22 de ICT International (dcha.) (ver especificaciones en la tabla 1.6).

**Tabla 1.6.** Principales especificaciones del medidor de potencial hídrico SEC-3115P40G4V22.

Rango de medición	Rango de T <sup>a</sup> y HR	Resolución	Precisión	Duración medida
64 mm	-40 a 60 °C 0 a 100 %	< 1µm	± 3 °C	5 min a 5 h

De manera alternativa, se puede llevar a cabo la medición del potencial hídrico en cualquier momento del día bajo condiciones controladas. En este caso, se coloca la hoja o rama en el interior de una bolsa de plástico que no deje pasar la luz y, así, evitar cualquier intercambio gaseoso. Pasado un tiempo considerable (preferentemente tras una noche) se alcanza el equilibrio entre el potencial hídrico de esa bolsa y el del tallo de la muestra a analizar, lo que permite tomar medidas no condicionadas por la hora solar.

### **Medida de fotosíntesis, intercambio de gases y fluorescencia de clorofila en la planta (circuito de gases acoplado a IRGA)**

El IRGA es un sensor que mide la concentración de determinados componentes en gases mediante la medida de la absorbancia del gas en el infrarrojo. Es muy utilizado para medir concentraciones de agua y CO<sub>2</sub> en el aire. Existen numerosos modelos de equipos que utilizan IRGAs acoplados a un circuito de aire con una cámara de medida para medir tasa de intercambio gaseoso en vegetales, con lo que se puede calcular la tasa de asimilación neta, o fotosíntesis (A). Entre ellos, uno de los analizadores más utilizados en el campo de la ecofisiología es el analizador de gases LI-COR® (Figura 1.19). Este equipo portátil consiste en un circuito de gases acoplado a una cámara hermética donde se deposita la muestra (hoja o ramillo), que contiene dos sensores de análisis de gases por infrarrojos (IRGAs) para controlar la entrada y salida de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O en la cámara. Además, permite obtener un control automatizado sobre todas las condiciones ambientales de la hoja, como la temperatura, la intensidad lumínica recibida y la tasa de flujo gaseoso, pudiendo alcanzar mediciones de alta precisión de diferentes variables asociadas a la fisiología vegetal.

Los equipos más avanzados, como el modelo LI-6400XT de LIC-COR, ofrecen grandes prestaciones en cuanto al control de los analizadores de gas, la ruta y las condiciones de flujo y las respuestas térmicas (Figura 1.20). El analizador está equipado con dispositivos para humidificar o secar la corriente de aire independientemente del caudal circulante, al poseer un control automático de vapor de agua. También permite el control de un flujo estable de CO<sub>2</sub>, eliminándolo del flujo de aire con un filtro o incorporándolo de forma controlada al circuito a través de un inyector de CO<sub>2</sub>. Además, permite monitorizar las condiciones de luminosidad, tanto mediante la medida de la radiación incidente, como a través de dispositivos de luz PAR artificial acoplados a la cámara, así como la temperatura del aire en la cámara, que también se puede estabilizar mediante unos módulos Peltier acoplados a la misma. Todas estas prestaciones permiten una alta precisión y flexibilidad en cuanto a su operatividad.

Los flujos de CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y la conductancia estomática a nivel foliar se pueden caracterizar a través de mediciones de intercambio de gases. Adicionalmente, las mediciones de fluorescencia de la clorofila, que permite este dispositivo con un sensor adicional que se acopla a la cámara de medida, proporciona información sobre los procesos de fotosíntesis, incluyendo la tasa de transferencia de electrones (ETR) alimentada por la luz solar y la extinción no fotoquímica (NPQ) que protege las hojas contra los efectos nocivos cuando



**Figura 1.19.** Sistema de medición de fotosíntesis portátil LI-6800 LI-COR (ver especificaciones en la Tabla 1.7).

**Tabla 1.7.** Principales especificaciones del sistema de medidor de fotosíntesis portátil LI-6800 LI-COR.

Rango de medición ( $\mu\text{mol mol}^{-1}$ )	Presión ( $\mu\text{mol mol}^{-1}$ )	Precisión ( $\mu\text{mol mol}^{-1}$ )	Sensitividad ( $\mu\text{mol mol}^{-1}$ )	Rango T <sup>a</sup> (°C)	Ratio circulación de aire ( $\mu\text{mol s}^{-1}$ )
CO <sub>2</sub> Gas analizador					
0-3100	400, 4 seg señal (RMS $\leq$ 0,1)	a 1% de lectura 200; $\pm$ 2 a <200	$\leq$ ±1 variación a 400	Funcionamiento (0 a 50 °C) Almacenamiento (-20 a 60 °C)	680 – 1700
H <sub>2</sub> O Gas analizador					
0-75	A 10, 4 seg señal (RMS $\leq$ 0,01)	a 1,5% de lectura a >5, $\pm$ 0,08 a <5		Funcionamiento (0 a 50 °C) Almacenamiento (-20 a 60 °C)	0 – 1400



**Figura 1.20.** Detalle de la cámara de medida del LI-COR LI6400XT, con el sensor de fluorescencia y emisor de luz PAR acoplado.

se absorbe luz en exceso. Al medir de manera simultánea la fluorescencia de clorofila A y el intercambio de gases, se puede obtener un resultado más eficiente de las reacciones de fotosíntesis que producen y consumen energía al mismo tiempo. La relación de ambas medidas es una medición de la eficiencia de la planta en el uso de la energía procedente de la luz absorbida necesaria para asimilar el CO<sub>2</sub>. De esta forma, se puede estudiar las afecciones producidas por estrés ambientales, como la escasez de precipitación y el aumento de temperaturas.

La cámara de flujos de CO<sub>2</sub> en suelos no profundos es otro dispositivo que se puede acoplar al equipo; permite hacer mediciones rápidas para conocer la variabilidad espacial de la respiración del suelo en un área determinada.

**Medida del crecimiento radial (dendrómetro de banda automático)**

Un dendrómetro es un dispositivo que se utiliza para medir las dimensiones de la sección de un árbol. En su forma más simple, un dendrómetro puede ser una cinta métrica o regla que rodea el tronco de un árbol (Figura 1.21). Este medidor, conocido como dendrómetro manual, puede dejarse colocado y monitorizarse diaria, semanal o mensualmente para registrar el crecimiento de las plantas.



**Figura 1.21.** Dendrómetro de banda automático DRL26C de Environmental Measuring Systems Brno (ver especificaciones en la Tabla 1.8).

**Tabla 1.8.** Principales del dendrómetro DRL26C.

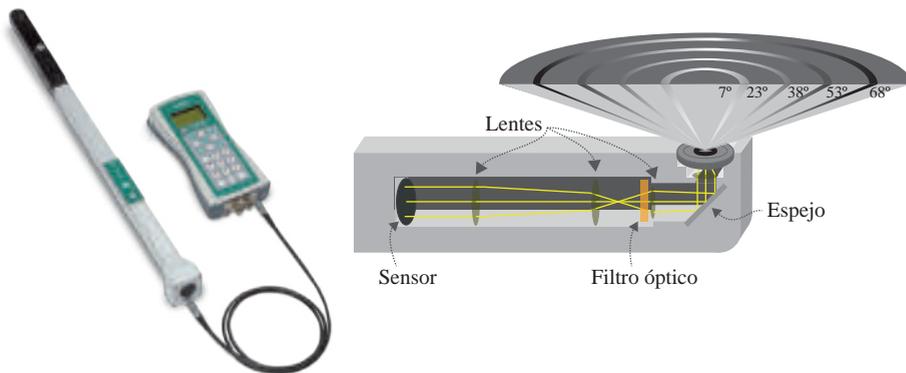
Rango de medición	Rango de T <sup>a</sup> y HR	Resolución	Precisión	Duración medida
64 mm	-40 a 60 °C 0 a 100 %	< 1µm	± 3 °C	5 min a 5 h

Existen otros sensores para medir el incremento del radio de una sección del tronco. Por ejemplo, el sensor de posición giratoria no invasiva mide el diámetro de la sección y su crecimiento y registra los datos internamente (Figura 1.21). El registrador de datos interno

permite evaluar el crecimiento a largo plazo a través de los registros de los cambios en el diámetro del tallo con una resolución de 0,001 mm, resolución con la que se pueden observar las fluctuaciones diarias en el tejido del tronco producidas por la temperatura y las variaciones diarias del flujo que circula por él. Estas fluctuaciones, al combinarse con las fluctuaciones del flujo de savia, dan lugar a una correlación entre el agua consumida y la compresión de la hidráulica funcional del árbol.

### Medida del índice de área foliar (LAI)

La cantidad y espesura del follaje en una copa o dosel vegetal es un indicador de estructura valioso, que se relaciona con el estado fitosanitario del árbol o con el efecto de estreses abióticos, como la temperatura o la falta de agua. Además, la frondosidad y el estado de una copa se relaciona con la capacidad de transpiración de la planta y, por tanto, con el potencial hídrico y el transporte de agua y nutrientes en la planta. Esta frondosidad se estima a través del índice de área foliar (LAI por sus siglas en inglés) y se puede estimar en base a la rapidez con que se atenúa la radiación a medida que pasa por la copa o dosel (Figura 1.22).



**Figura 1.22.** Sensor LAI LiCOR LAI 2200C (izq.) (ver especificaciones en la Tabla 1.9); esquema de los componentes del sensor (dcha.).

**Tabla 1.9.** Principales especificaciones del medidor de índice de área foliar LAI 2200C.

Rango T <sup>a</sup>	Rango HR	Precisión	Sensor óptico		
			Radiación	Rango long onda	Cubierta ángulo nominal
Funcionamiento -20 a 50 °C Almacenamiento -40 a 65 °C	0 a 95%	En horizontal 2,5 m CEP a cielo abierto	99% a 490-650 nm 99,9% a 650 nm	320 a 490 nm	Anillo 1: 0,0 a 12,3° Anillo 2: 16,7 a 28,6° Anillo 3: 32,4 a 43,4° Anillo 4: 47,4 a 58,1° Anillo 5: 62,3 a 74,1°

La medida de esta atenuación en un dispositivo LAI se realiza en cinco ángulos desde el cenit, permitiendo obtener orientación de los objetos detectados. El sensor óptico proyecta la imagen de su vista casi hemisféricamente a través de los cinco detectores dispuestos en forma de aros concéntricos (Figura 1.22). Cuando el sensor se encuentra nivelado en orientación cenital, el detector número 1 medirá el brillo situado encima y el detector número 2 medirá el brillo de un aro centrado en el ángulo cenital de 68°. Una medición normal consta de un mínimo de 10 números, 5 proceden de la señal de los detectores y los 5 restantes son las lecturas llevadas a cabo con el sensor situado debajo del objeto/vegetación a medir. Con la orientación del sensor hacia el cielo, se calculan los valores de transmitancia vegetal dividiendo los pares correspondientes a partir de ellas. La cantidad foliar (índice de área foliar, LAI) y la orientación (ángulo promedio de la inclinación foliar, MTA) son estimadas a partir de las transmitancias en los cinco ángulos cenitales.

## **5. Diseño de una instalación de sensores próximos autónomos en sistemas forestales**

Las preguntas que nos hacemos a la hora de definir nuestro trabajo (qué medir y cómo dónde y cuándo medir) hacen referencia directamente al diseño experimental, entendiéndose como tal la determinación de aspectos como el número de localizaciones a monitorizar, el número de individuos, las repeticiones necesarias, el número de sensores o la temporalidad de la medida.

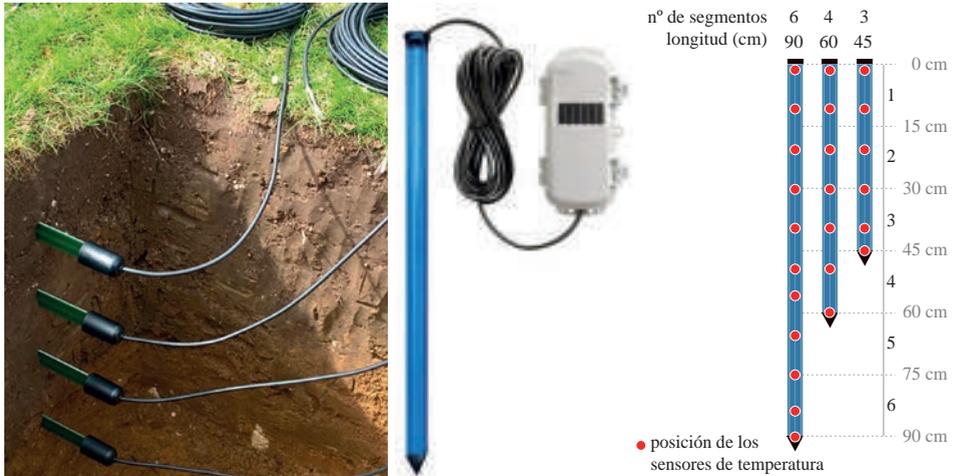
Existe un gran número de detalles que van a influir en las respuestas a estas preguntas, y que determinarán la calidad de nuestras estimaciones y de los resultados que obtengamos. Entre estos detalles hay que considerar los que vienen impuestos por el tipo de sensor que se vaya a utilizar. Dependiendo de la naturaleza y la magnitud de la variable que se desee monitorizar y del equipo elegido, la instalación de los sensores nos planteará unas restricciones o condiciones específicas. A continuación, se resumen una serie de restricciones impuestas por la localización del sensor, el origen de la característica a monitorizar y la temporalidad de la medida.

### **5.1. Restricciones del diseño experimental en función de la localización del sensor**

Como se ha visto con anterioridad, los sensores utilizados para el monitoreo de la vegetación pueden dividirse, según su localización, en sensores de suelo y sensores de árbol, copa o dosel.

#### **Sensores de suelo**

Los sensores que miden las características de un suelo presentan, en general, el problema de la variabilidad espacial del mismo. Normalmente, dicha heterogeneidad suele abordarse en el sentido vertical, colocando sondas a diferentes profundidades, como se hace comúnmente con las sondas de humedad (Figura 1.23).



**Figura 1.23.** Soluciones para recoger la variabilidad vertical de las características de suelo: instalación de sensores de humedad de suelo a varias profundidades (izq.); sensor capacitivo multiprofundidad RXW-GPxA de HOBONet (centro) y número de segmentos y profundidad de medición de los modelos disponibles (dcha.).

Existen diferentes alternativas: los equipos de múltiples canales que monitorizan la humedad de sondas enterradas a diferente profundidad (Figura 1.23 izq.) y los sensores multiprofundidad, como la sonda capacitiva HOBONet® que es capaz de determinar la humedad del suelo hasta 90 cm en 6 secciones diferentes (Figura 1.23 centro y dcha.).

En cualquier caso, estas instalaciones no recogen la variabilidad horizontal del suelo, por lo que se debe valorar cuál es la importancia de dicha heterogeneidad en los resultados que se obtengan. Puede suceder que se esté más interesado en la heterogeneidad horizontal dentro de una parcela que en la vertical, por lo que se reduciría el número de sensores en profundidad y se aumentaría el número de localizaciones donde enterrarlos, o viceversa. En este último caso, se debería considerar la opción de adquirir sensores como el HOBONet®, aunque su coste sea más elevado. Así, todas estas ponderaciones y decisiones van a condicionar el número de repeticiones que se puedan tener, así como la calidad final de las estimaciones de la variable en cuestión.

### Sensores de árbol, copa o dosel

Las restricciones que imponen los sensores instalados en la parte aérea de la planta guardan relación, normalmente, con la estructura de la misma. Un caso típico es la instalación de dendrómetros en masas forestales irregulares, en masas en las que el manejo incluya podas o en masas situadas en zonas abruptas; en resumen, masas en las que la forma y posición del tronco de los árboles presente gran variabilidad entre individuos. Los dendrómetros mecánicos tienen bajo coste y, por tanto, la mejor opción suele ser colocar tantos como pies monitorizados tengamos; sin embargo, hay que considerar el trabajo que conlleva

la toma de datos y el mantenimiento de los mismos. Los sensores próximos autónomos que miden crecimiento diametral solucionan estos problemas, pero plantean otros retos, como la imposibilidad de colocar uno por cada pie, lo que nos lleva a tener que decidir qué pies son los más representativos de la masa. Lo mismo sucede con los dispositivos utilizados para determinar características de la copa o dosel como la transmitancia, o la medida directa o indirecta de LAI, como por ejemplo el sensor multispectral que incorpora el equipo TT+ de Nature4.0® (Figura 1.24). La medida de LAI se relaciona de forma estrecha con las características de transmitancia y reflectancia de la copa, que dependerán por supuesto de la especie, el estado de madurez del arbolado, su fenología y manejo, y las condiciones lumínicas del momento de la medida. Si se pueden controlar las variables anteriores, es posible crear relaciones significativas entre LAI y transmitancia o reflectancia capturada por un sensor. Con este fin, se pueden colocar sensores espectrales debajo o encima de una copa para monitorizar LAI de una forma continua.

En este caso, el resultado final dependerá de la estructura de la copa, de la posición del sensor, y también de su instalación (orientación). También hay que valorar la necesidad o posibilidad de establecer repeticiones. Por último, uno de los parámetros más utilizados en la monitorización de especies leñosas, el flujo de savia, plantea otros retos específicos, asociados por un lado a la variabilidad en forma y tamaño de los fustes, y por otro lado a la especie que se esté monitorizando. En primer lugar, hay que ser meticulosos con la colocación de las sondas, pero, además, hay que tener en cuenta la capacidad de reacción de la planta ante la herida que supone la colocación de la sonda. Esto influirá en el tiempo en el que la sonda de flujo de savia va a estar midiendo correctamente, por lo que debemos prever su recambio, y la localización de la sonda en las sucesivas instalaciones.



**Figura 1.24.** Sensores de transmitancia y reflectancia de copa: sensor TreeTalker (Nature 4.0) equipado con un sensor zenital multispectral de 12 bandas (se instala bajo copa, en el tronco, con una inclinación entre 15 y 25° sobre la vertical del tronco) (izq.); sensor de reflectancia y NDVI y dos sensores de infrarrojos Apogee de Edaphic Scientific instalados sobre la copa de una encina (dcha.).

## 6. Aplicación de la sensorización próxima al sector forestal

Uno de los retos más importantes en el manejo de masas forestales es la comprensión de las respuestas de la masa forestal a las perturbaciones y al cambio climático. Estas respuestas son complejas, ya que no atañen a una planta sino a un complejo de vegetación, manejo y presiones externas. La pregunta que podemos hacernos pues es ¿cómo podemos aplicar la ecofisiología y los sensores próximos autónomos para predecir y entender las respuestas de árboles individuales a las condiciones ambientales?

La tendencia actual en el manejo de masas forestales es la aplicación de técnicas de análisis espacial como soporte de una gestión eficiente de grandes áreas. Este análisis espacial se basa mayormente en el uso de sensores remotos aéreos y de satélite, y sistemas de información geográfica. Estas técnicas utilizan los modelos, que son aproximaciones a la realidad, para analizar y predecir el estado vegetativo de una masa, la producción y los aprovechamientos de la misma, pero por su naturaleza (un modelo es un constructo estadístico-matemático que utiliza unas variables independientes para predecir el comportamiento de una variable objetivo), estos análisis necesitan datos ambientales y del comportamiento de la vegetación en las masas forestales para su ajuste.

Para tener una mejor comprensión y mejores predicciones de las respuestas de los bosques a las condiciones ambientales cambiantes se requieren estudios de respuesta de árboles individuales. El empleo de fuentes de datos de monitoreo *in situ* impulsan el control forestal al aumentar las escalas espaciales y temporales del monitoreo, traducándose en una mejor comprensión de los procesos forestales y las amenazas potenciales.

Los asuntos que más atención requieren actualmente en nuestras masas forestales son la producción sostenible, las perturbaciones (incendios, plagas, fenómenos naturales), y el decaimiento forestal. En estos tres ámbitos, la sensorización próxima autónoma de árboles individuales ofrece numerosas posibilidades para la obtención de un enorme volumen de datos de gran calidad, que ayuden a modelizar y evaluar, entre otros, los siguientes procesos:

- Los sensores de flujo de savia, humedad (de suelo y madera) y meteorológicos, ayudan a monitorizar el riesgo de incendio o procesos de estrés.
- Los dendrómetros son imprescindibles para estimar la producción de biomasa arbolada.
- Los sensores espectrales de copa, LAI, fotosíntesis y potencial hídrico, caracterizan, mediante la ecofisiología, la respuesta diferencial del arbolado ante diferentes tipos de estrés biótico y abiótico, ayudando en la gestión del decaimiento y las enfermedades forestales.
- Se pueden usar diferentes sensores para evaluar la estabilidad estructural del arbolado, permitiendo prevenir riesgos en arbolado urbano ante fenómenos meteorológicos extremos.

Por otro lado, y como se dijo al inicio de este capítulo, las posibilidades de sensorización en el entorno forestal han aumentado al tiempo que ha disminuido el coste de adquisición y la dificultad de manejo y mantenimiento de estos sensores. Los primeros equipos disponibles eran equipos muy costosos, utilizados para investigación, y que requerían de instalaciones complicadas, con baterías, sistemas de recuperación de datos y alimentación complejos y costosos. En la actualidad, existen numerosas empresas que ofrecen soluciones compactas, basadas en tecnologías inalámbricas, más baratas y con necesidades de alimentación mucho menores, que permiten el establecimiento de estas parcelas a un coste y con un esfuerzo asumible. Por tanto, la implementación de estos sensores en el ámbito de la gestión forestal es un proceso en marcha y que no tiene vuelta atrás, como ya se está viendo en el campo de la agricultura.

## Bibliografía

- Granier, A. 1985. A new method of sap flow measurement in tree stems. *Ann. Sci. Forestières*, 42, 193-200.
- Ariza Salamanca, A.J., Navarro-Cerrillo, R.M., Bonet-García, F.J., Pérez-Palazón, M.J., Polo, M.J. 2019. Integration of a Landsat Time-Series of NBR and Hydrological Modeling to Assess *Pinus pinaster* Aiton. Forest Defoliation in South-Eastern Spain. *Remote Sensing*, 11(19): 2291.
- Fernández, M.E., Gyenge, J.E. 2010. Técnicas de medición en ecofisiología vegetal: conceptos y procedimientos., Ed. Ediciones INTA, Buenos Aires.
- Navarro-Cerrillo, R.M., Trujillo, J., de la Orden, M.S., Hernández-Clemente, R. 2014. Hyperspectral and multispectral satellite sensors for mapping chlorophyll content in a Mediterranean *Pinus sylvestris* L. plantation. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf*, 26: 88-96.
- Navarro-Cerrillo, R.M., Varo-Martínez, M.Á., Acosta, C., Palacios-Rodríguez, G., Sánchez-Cuesta, R., Ruiz-Gómez, F.J. 2019 Integration of WorldView-2 and airborne laser scanning data to classify defoliation levels in *Quercus ilex* L. Dehesas affected by root rot mortality: Management implications. *Forest Ecol. Manag.* 117564, 451.
- Pérez-Harguindeguy, N., Diaz, S., Garnier, E., Lavorel, S., Poorter, H., *et al.* 2013. Nuevo manual para la medición estandarizada de caracteres funcionales de plantas. *Aust. J. Bot.* 61: 167-234.
- Prasad, M.N.V. 1996. *Plant Ecophysiology*, Ed. John Wiley & Sons, Nueva York.
- Quero, J.L., Sterck, F.J., Martínez-Vilalta, J., Villa R. 2011. Water-use strategies of six co-existing Mediterranean woody species during a summer drought. *Oecologia*, 166(1):45-57.
- Raghavendra, C.S., Sivalingam, K.M., Znati, T. 2006. *Wireless Sensor Networks*, Ed. Springer, Amsterdam.
- Valentini, R., Belelli Marchesini, L., Gianelle, D., Sala, G., Yaroslavtsev, A., Vasenev, V., Castaldi, S. 2019. New tree monitoring systems: from Industry 4.0 to Nature 4.0. *Ann. Silv. Res.*, 43(2), 84-88.
- Violle, C., Navas, M. L., Vile, D., Kazakou, E., Fortunel, C., Hummel, I., Garnier, E. 2007. Let the concept of trait be functional!. *Oikos*, 116(5), 882-892.

Acceso al  
material complementario



Ejercicio 1



Ejercicio 2