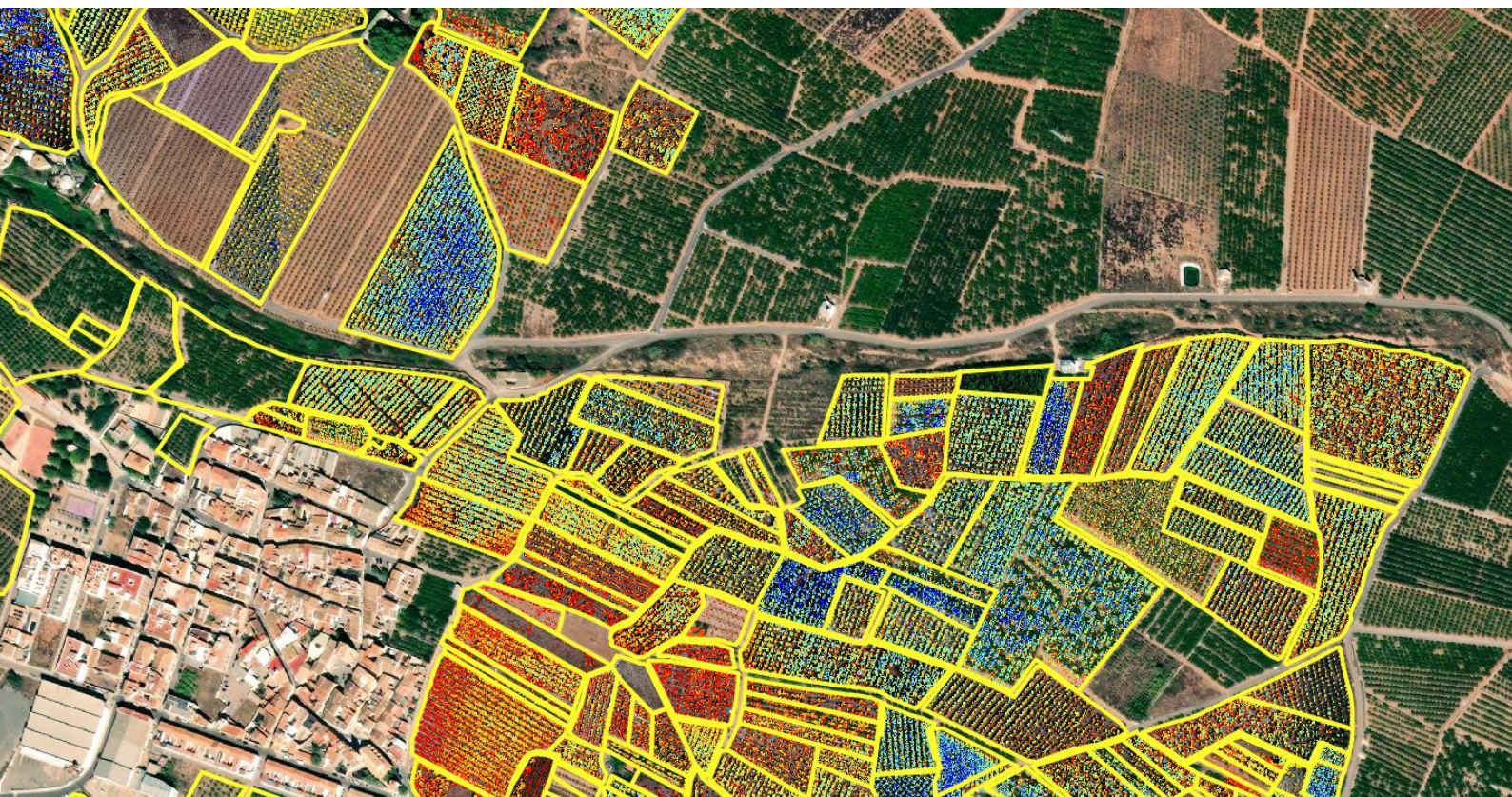


Manual de Agricultura de Precisión en Riego y Fertilización.

Aplicación Práctica y Claves para su desarrollo en la Citricultura Española.



Grupo Operativo
de Agricultura de Precisión
en Regadío y Fertilización
de Cítricos



En 2018 se crea el Grupo Operativo de Agricultura de Precisión en Riego y Fertilización de Cítricos (GO Cítricos), fomentado por la Asociación Valenciana de Agricultores, y se elabora el proyecto denominado “Aumento del uso eficiente del agua y de los nutrientes en la Comunidad Valenciana y Andalucía”, con la redacción y coordinación del agente de innovación, el Ingeniero Gil María Campos Alabau.

El proyecto es financiado por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, a través del Plan Nacional de Desarrollo Rural (PNDR), y con una financiación total de 393.300,35€. El 80% ha sido cofinanciado por la Unión Europea.

El Grupo busca aumentar la eficiencia en el riego y la fertilización de cítricos implantando un servicio integral de gestión, captando datos a través de sensores terrestres y aéreos, siendo tratados mediante Inteligencia artificial, y mejorando la calidad de los frutos.

Además A.V.A.-Asaja, y de Gil M^a Campos Alabau, también son miembros del Grupo Operativo y ejecutan el trabajo Asaja-Málaga, el Servicio de Riego y el Centro de Desarrollo de Agricultura Sostenible del Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias, el Consejo Superior de Investigación Científicas, la Universidad Politécnica de Valencia, el Ingeniero Ignacio Puech PhD, y las empresas Dimagro y Hemav.

Representante del Grupo ante la administración.

Don Cristóbal Aguado Laza. Presidente de AVA-Asaja.

Miembros beneficiarios.



Ignacio Puech
Suanzes



Coordina:

Gil M^a Campos Alabau


Miembro subcontratado:



Autoría.

El presente trabajo ha sido coordinado por Juan Manzano Juárez, de la Universitat Politècnica de València.

El **capítulo 1** de **Antecedentes** ha sido elaborado por Juan Manzano Juárez y Gil M^a Campos Alabau. El **capítulo 2**, denominado **Cítricos**, ha sido elaborado por Juan Gabriel Pérez Pérez. El **capítulo 3**, sobre el **Estado hídrico, el riego deficitario y la calidad del agua**, ha sido elaborado por Diego Intrigliolo. El **capítulo 4**, sobre el **Estado nutricional**, por Ana Quiñones Oliver, del Centro para el Desarrollo de la Agricultura Sostenible del Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias. El **capítulo 5**, denominado **Requisitos de las instalaciones de riego para aplicar AP**, ha sido elaborado por Juan Manzano Juárez. El **capítulo 6**, denominado **Tecnologías** ha sido elaborado por diversos autores. El apartado **6.1.** referente a las **Estaciones agrometeorológicas**, ha sido elaborado por Luis Bonet Pérez de León, del Servicio de Tecnología del Riego del IVIA. El apartado **6.2.** denominado **Empleo de sensores de humedad**, ha sido elaborado por el Ignacio Puech Suanzes. Los apartados **6.3 y 6.4** sobre las **Cámaras de presión** y las **Sondas de succión**, han sido elaborados por Juan Gabriel Pérez Pérez y Ana Quiñones Oliver del IVIA. El apartado **6.5. Teledetección**, ha sido elaborado por Daniel Cano de Hemav, Alberto de Pascual Tormo de la empresa Buitrago y por José Blasco Ivars del Centro de Agroingeniería del IVIA. El apartado **6.6** denominado **Red de riego y automatización**, ha sido escrito por Juan Manzano Juárez y Miguel Ángel Jiménez Bello. El **capítulo 7** denominado, **Implementación práctica sobre una sociedad de riego**, ha sido elaborado por Gil M^a Campos Alabau. Los **capítulos 8 y 9**, denominados **Tendencias o perspectivas futuras**, y la **Conclusión** han sido elaborados de forma conjunta por los autores del libro, de forma coordinada por Juan Manzano Juárez.

Para ponerse en contacto con los autores del libro, pueden dirigir sus comentarios a la atención de Juan Manzano Juárez como coordinador de la obra, a la dirección juamanju@agf.upv.es

Primera edición: Septiembre 2021

Grupo Operativo de Agricultura de Precisión en Regadío y Fertilización de Cítricos.
Con la financiación de PNDR, MAPA y la Unión Europea.

Impreso en España



Contenido

1. Antecedentes.	3
2. Cítricos.	4
3. Estado hídrico, riego deficitario y calidad del agua.	6
3.1. Estado hídrico.	6
3.2. Riego deficitario.	8
3.3. Calidad del agua de riego.	9
4. Estado nutricional.	9
4.1. Nutrientes esenciales.	10
4.1.1. La función de los nutrientes esenciales en la producción cítrica.	11
4.2. Herramientas actuales para conocer el estado nutricional de las plantas.	12
4.2.1. Diagnóstico nutricional mediante análisis foliar.	12
4.2.2. Diagnóstico nutricional mediante análisis visual.	15
4.2.3. Herramientas de agricultura de precisión para el diagnóstico nutricional.	18
4.3. Procedimiento para el muestreo foliar.	18
4.3.1. Criterios para la selección de los árboles a muestrear.	18
4.3.2. Lista de verificación para el análisis foliar para el diagnóstico nutricional.	19
5. Requisitos de la instalación de riego para aplicar AP.	19
6. Tecnologías.	21
6.1. Estaciones agrometeorológicas.	21
6.1.1. La evapotranspiración de referencia (ET_0).	22
6.1.2. Estaciones en red (Red SIAR)	23
6.1.3. Cálculo de necesidades de riego.	24
6.2. Empleo de sensores de humedad.	28
6.2.1. Definición y uso.	28
6.2.1. Tipos.	29
6.2.2. Unidades de medida de la humedad en suelo	30
6.2.3. Sensor a utilizar (selección).	31
6.2.4. Uso de los datos generados por los sensores de humedad de suelo.	32
6.2.5. Sensores de humedad en el proyecto GoCitrics.	32
6.2.6. Instalación.	32
6.2.7. Manejo de las sondas de humedad de suelo.	35
6.3. Cámara de presión.	44
6.3.1. Interpretación de datos.	45
6.3.2. Equipos en el mercado.	45
6.4. Sondas de succión.	46
6.5. Teledetección.	49

6.5.1.	Captura de datos.	50
6.5.2.	Plataformas para la captura de datos.	56
6.5.3.	Índices de vegetación de interés.	66
6.5.4.	Sistema de Información Geográfica.	69
6.6.	Red de riego y automatización.	71
6.6.1.	Sistemas de bombeo.	71
6.6.2.	Hidrantes y electroválvulas.	73
6.6.3.	Equipos de inyección de fertilizante.	73
6.6.4.	Programadores y sistemas de telegestión.	75
6.6.5.	Modelo informático.	76
6.6.6.	Condicionantes en el transporte y distribución de fertilizantes.	77
7.	Implementación práctica sobre “sociedad de riego tipo-GOCitricos”.	78
7.1.	Inicio de los trabajos. Condicionamientos previos.	78
7.2.	Evaluación hidráulica y energética, y adecuación de las instalaciones.	79
7.3.	Instalación de la sensorización terrestre y aérea.	81
7.4.	Seguimiento del riego, de la nutrición, de la situación sanitaria y de las labores culturales.	84
7.5.	Impacto y costes en las sociedades de riego.	86
7.5.1.	Impacto.	86
7.5.2.	Costes.	88
8.	Tendencias o perspectivas futuras.	90
9.	Conclusión.	92
10.	Referencias.	93

1. Antecedentes.

La Agricultura de Precisión (AP) es una estrategia de gestión que recoge, procesa y analiza datos temporales, espaciales e individuales y los combina con otras informaciones para respaldar las decisiones de manejo de acuerdo con la variabilidad estimada, y así mejorar la eficiencia en el uso de recursos, la productividad, la calidad, la rentabilidad y la sostenibilidad de la producción agrícola [1]. La agricultura de precisión se basa en cuidar de forma adecuada a la planta en cada momento y según sus necesidades utilizando para ello la tecnología existente, que nos diga exactamente su estado sanitario, nutricional e hídrico, analizando las posibilidades de actuación de una forma rápida, y pudiendo aplicar las soluciones que se han decidido, porque existe una infraestructura que lo permite.

Si nos centramos en el aporte de agua y nutrientes, se persiguen aplicaciones más eficientes y la optimización de los procesos agrícolas, por medio de la automatización, las tecnologías de la información y la adquisición de datos, etc. Por tanto, a través de las redes de riego a presión y dispositivos de inyección de fertilizantes (propias de sociedades comunitarias/comunidades de regantes o grandes instalaciones) y llegando hasta el último gotero, la tecnología actual permite definir zonas diferenciadas de manejo de riego y fertilizantes. Así la superficie ocupada por cada planta, acaba constituyendo la superficie mínima teórica de gestión.

Al mismo tiempo, requiere que el sustrato socio-cultural acompañe al proceso, que aproveche la experiencia y conocimiento de las diversas disciplinas que participan en su desarrollo, incluyendo el trabajo en equipo entre el propietario de las parcelas, los trabajadores de campo, los investigadores, los ingenieros de campo, los especialistas en el cultivo, en el riego, en la fertilización y en la sanidad vegetal, los expertos en sensorización aérea y terrestre, los informáticos que analizan los datos, y la de profesionales que permitan que todo este trabajo se lleve a cabo de forma coordinada, sencilla y en tiempo real. Es decir, a parte del conocimiento que las nuevas tecnologías permiten tomar en el campo, y de la participación de los agentes mencionados, se ha de poder procesar los resultados rápidamente para dar una solución inmediata a cada cultivo según lo necesite.

En el fondo, esto no escapa del tradicional sentido común (aquel que el conocimiento y la experiencia ha ido validando comunitariamente) que los agricultores han ido aplicando en campo, haciendo aquello que han visto que funciona, consultando a otros productores o especialistas si están a su abasto, para mejorar, poco a poco y año a año, lo que hacen, conversando entre ellos para intercambiar la información, probando en sus parcelas algunas soluciones. La situación actual, aparte de dar un nuevo nombre a esta metodología, y a englobarla en una serie de acciones definidas, permite acelerar el proceso de experimentación y de obtención de resultados, pasando de una unidad de medida de décadas a semanas para obtener soluciones adecuadas, además de hacerlo directamente en la parcela de trabajo. Esto no es fácil, puesto que requiere de un cambio de hábitos, y el ser humano, ya sea en la industria o el turismo, como en la ciudad o en el campo, requiere de tiempo para poder adaptarse y capacitarse para los nuevos paradigmas de trabajo [2]. Así está ocurriendo en la digitalización industrial, dónde el principal cambio no es de software, sino realmente de cultura de trabajo y de modelo mental de pensamiento [3]. Ahí está el cambio fundamental que nuestra experiencia nos indica que es necesario implementar en el campo para poder avanzar hacia una verdadera agricultura de precisión,

un cambio de modelo de pensamiento y de cultura de trabajo, y no realmente en un cambio tecnológico. Esto hemos vuelto a comprobarlo en el proyecto desarrollado que ha dado luz a este libro.

Aparte de lo anterior, y de forma general, también se ha de entender que en una sociedad globalizada, y con las limitaciones de crecimiento que tenemos, sólo se puede innovar de una forma sistémica, mejorando los procesos de aprendizaje comunitarios [4], considerando en el mismo la mejora de trabajo en equipo, y el desarrollo social, económico y ambiental. Lo tecnológico es una pata más del proceso de agricultura de precisión.

Aunque en el manual no se contempla este aspecto, también es importante que la regulación legal acompañe a la utilización de nuevas tecnologías, tanto en la sensorización aérea (limitación de la resolución por razones militares o preferencia por el uso recreativo del espacio aéreo frente al uso agrario a la hora de utilizar drones), en el uso de fertilizantes y agua, así como en la tipología de agricultura que se lleve a cabo, convencional o ecológica.

En la presente publicación, a la luz del trabajo realizado, pretendemos aumentar la comprensión sobre el estado del arte de la Agricultura de Precisión, en Riego y Fertilización, y especialmente en el cultivo de cítricos. Desde nuestra humilde experiencia, planeamos hasta donde se puede llegar a día de hoy; mostrando el conocimiento práctico aplicable a una sociedad de riego e intentado identificar lo que aún no se puede hacer y va a necesitar desarrollos futuros.

En el presente trabajo se recoge, por tanto, la experiencia del “Grupo Operativo de Agricultura de Precisión en Regadío y Fertilización de Cítricos. Aumento del uso eficiente del agua y de los nutrientes en la Comunidad Valencia y Andalucía”. Diferentes especialistas, cada uno desde su óptica, han colaborado para explicar cómo se puede mejorar la gestión del riego y la fertilización en instalaciones cítricas regadas mediante sistemas modernizados a presión. No se pretende realizar una revisión exhaustiva de tecnologías, ni proponer nuevas metodologías o alternativas experimentales, sino mostrar herramientas que ya están al alcance de los regantes. Se trata por tanto, de alternativas comerciales y que permitirán mejorar los resultados económicos de las explotaciones a corto y medio plazo.

En el documento se revisa, en primer lugar, que aspectos se deben conocer del cultivo cítrico y su estado hídrico y nutricional. Posteriormente y tras revisar brevemente sobre qué tipo de instalaciones se puede empezar a trabajar, se repasan las tecnologías que se consideran interesantes. Por último, se realiza un “ejercicio práctico” de implementación sobre una de las Sociedades de Riego sobre las que ha trabajado el Grupo Operativo.

2. Cítricos.

La oferta varietal de los cítricos en España es cada vez más amplia, de hecho, en los últimos años se han presentado más de 50 nuevas variedades de naranjas y mandarinas, y se estima que en los próximos años esa oferta se incrementará de forma considerable. Esta diversidad varietal permite poder extender la campaña de comercialización a más de 10 meses, iniciándose en el mes de septiembre, con las variedades tempranas de

mandarina, satsumas y limones tempranos, y extendiéndose hasta cerrar la campaña en el mes de junio con las variedades tardías de naranja y el limón Verna (Figura 1).

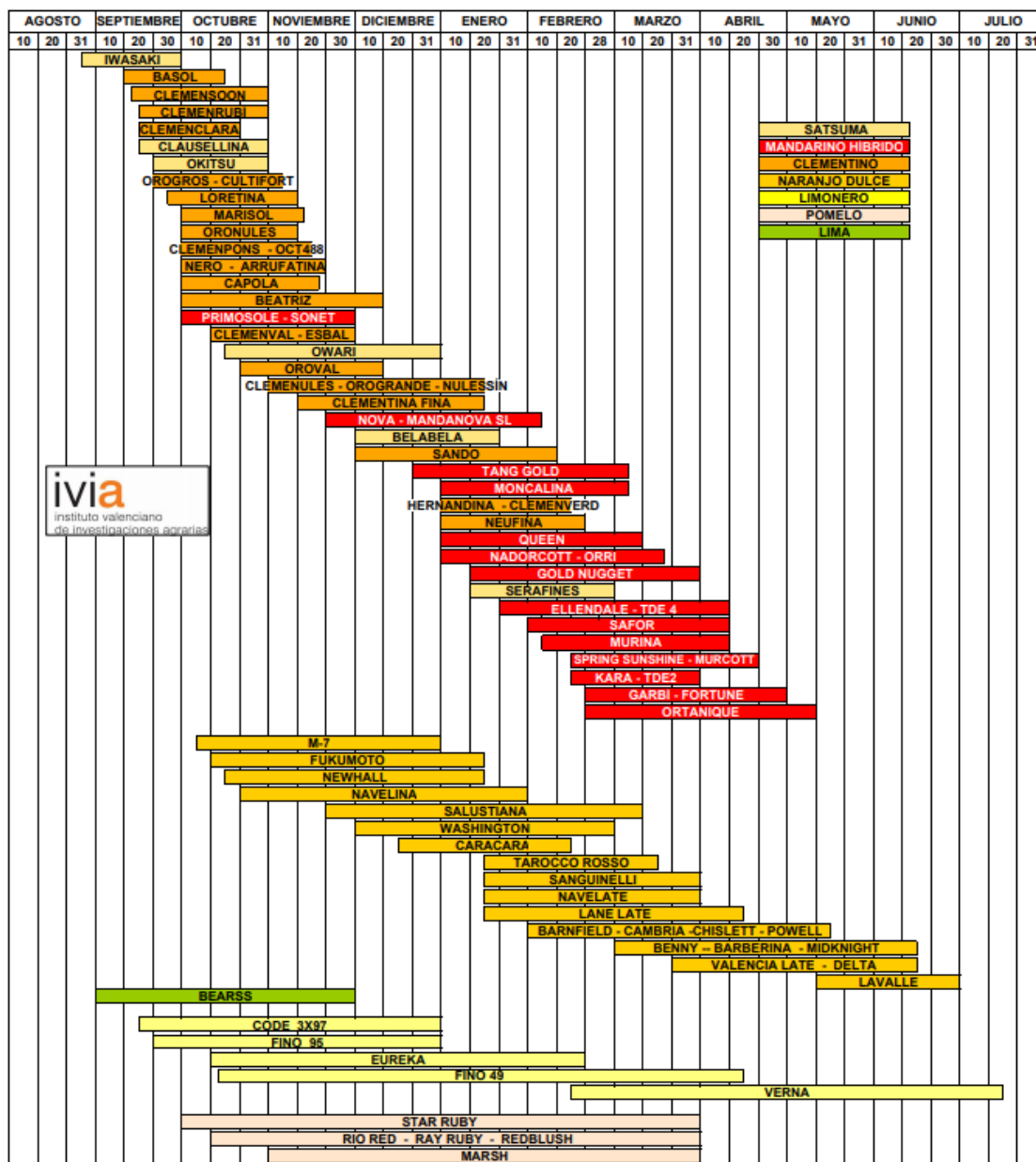


Figura 1. Calendario de variedades de cítricos (Fuente: <http://www.ivia.gva.es/es/variedades>).

El manejo del riego y fertilización debe estar estrechamente ligado a la fenología del cultivo, especialmente al desarrollo del fruto (Figura 2). Por este motivo, la amplia oferta varietal genera diferentes escenarios para el manejo de la fertirrigación. En variedades tempranas, especialmente en variedades de mandarina del grupo de las 'Oronules', y en las variedades limonero 'Fino 95' y 'Fino 49' injertadas sobre *C. macrophylla*, las etapas de crecimiento rápido (fase II) y de maduración del fruto (fase III) tienen lugar en apenas 3-4 meses. En este periodo el manejo óptimo del riego es crucial para conseguir buenos calibres de fruto. Respecto a la fertilización, en el caso de las mandarinas tempranas, se requiere finalizar la aplicación de nitrógeno en el mes de agosto para favorecer la entrada en color del fruto durante el mes de septiembre. Tras la recolección, las variedades tempranas entran en un periodo de reposo que puede durar entre 3 y 4 meses. En este periodo

las necesidades hídricas del árbol son bajas, lo que disminuye la frecuencia de riegos. Aun así, se deben mantener 1-2 riegos a la semana, para mantener suficiente humedad en el bulbo y evitar la entrada de sales.

Periodos fenológicos de los cítricos

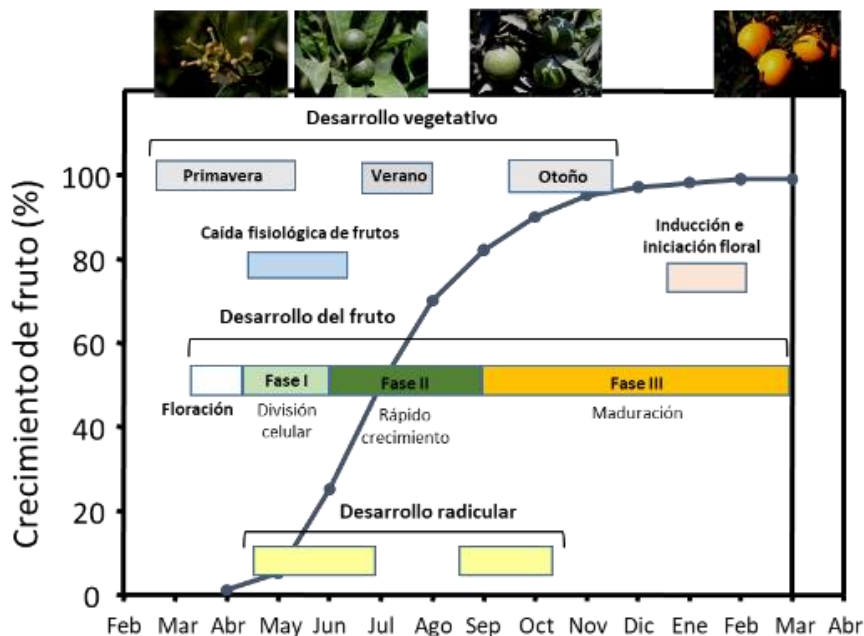


Figura 2. Esquema de los periodos fenológicos de los cítricos.

En variedades tardías (Figura 1), el escenario es diferente, ya que las etapas de desarrollo del fruto se extienden entre 8 y 10 meses. La presencia del fruto durante los meses de invierno y primavera genera que las exigencias hídricas y nutricionales en este tipo de variedades sean más elevadas. Además, en primavera, en este tipo de variedades conviven en el árbol frutos de diferentes campañas, los que están finalizando su maduración y lo que se están formando de la nueva campaña.

En comunidades de regantes (CCRR) que tienen centralizado el riego y la fertilización, la diversidad varietal genera dificultades para poder cumplir con las exigencias hídricas y nutricionales del cultivo en cada caso. En la mayoría de las CCRRs, el plan de riego y fertilización se establece en base al cultivo mayoritario. En el caso de CCRRs con una diversidad varietal muy amplia, sería recomendable sectorizar las unidades de riego, que agrupen las parcelas con variedades con exigencias similares, para poder realizar un mejor manejo de la fertirrigación.

3. Estado hídrico, riego deficitario y calidad del agua.

3.1. Estado hídrico.

Dado que las plantas integran las condiciones externas del entorno, clima y suelo a la vez, reflejándolas en su estado hídrico, parece lógica la utilización de métodos de programación del riego basados en la propia planta. Sin embargo, esta misma característica integradora, positiva desde el punto de vista fisiológico, constituye un inconveniente práctico. Esto se debe a que el estado hídrico de la planta (Ψ) no depende exclusivamente del

agua en el suelo disponible para la planta, sino también de las condiciones ambientales, por su influencia sobre la tasa de transpiración (T) y de la resistencia hidráulica en el continuo suelo-planta-atmósfera (R), según se resume en la ecuación $\Delta\Psi=R\cdot T$, donde $\Delta\Psi$ es la caída de potencial a lo largo de la trayectoria de transporte del agua. Esto dificulta, en cierto modo, su empleo como indicador del estado hídrico de los árboles. De todos modos, el mayor inconveniente operativo para medir el Ψ radica en que esta medida no puede automatizarse y, por ello, su determinación requiere la utilización de mano de obra cualificada. De ahí que se estén buscando sensores automatizables que permitan medir, en continuo y de forma remota, el estado hídrico de los árboles.

De entre los sensores automatizables que hoy día están intentando introducirse comercialmente, se encuentran los denominados dendrómetros (sensores LVDT) (Figura 3), que estiman el estado hídrico de las plantas a través de la medida de las variaciones de grosor del diámetro de un tronco o rama, transformándolas en señales eléctricas, cuyo registro es fácilmente automatizable.



Figura 3. Detalle de un dendrómetro instalado en el tronco de un naranjo.

En un día soleado el diámetro del tronco decrece durante las horas centrales del día, para luego recuperar lo perdido a lo largo de la noche e incluso crecer (Figura 3). A partir de estas variaciones de diámetro se calculan:

- la máxima contracción diaria (MCD), como diferencia entre el máximo diámetro del tronco alcanzado temprano por la mañana y el mínimo alcanzado normalmente por la tarde, y
- la tasa de crecimiento, como diferencia entre los máximos diarios alcanzados por el tronco en dos días consecutivos.

Por otra parte, la medida de la temperatura del dosel vegetal puede emplearse como un indicador del estado hídrico, dado que cuando la planta cierra los estomas tiende a calentarse (Figura 4). La temperatura de las hojas puede detectarse mediante sensores de infrarrojo o mediante termografía (Figura 4). Sin embargo, cabe

tener en cuenta que en los cítricos, el calentamiento de las hojas es menos notable que en otros cultivos, seguramente debido al tamaño de la hoja con una elevada relación perímetro/superficie que facilita el intercambio del calor con el ambiente [5]. De todos modos, la gran ventaja de las medidas termográficas, es la posibilidad de incorporar este tipo de sensores en diversos tipos de vehículos aerotransportados (desde drones y aviones hasta satélites) pudiendo obtener una mayor representatividad espacial de las medidas. Así, pues, tal y como se discute más adelante, las técnicas derivadas de la teledetección ofrecen la gran ventaja frente a cualquier sensor de campo de poder integrar amplias zonas de cultivo, permitiendo obtener determinaciones más representativas y favoreciendo la adopción de técnicas de riego de precisión.



Figura 4. Composición de imágenes de una porción de hoja con estoma, una cámara termográfica y una imagen térmica del dosel vegetal.

3.2. Riego deficitario.

Cuando no se pueden cubrir mediante el riego todas las necesidades de agua de un cultivo hay que recurrir a riegos deficitarios que, en su concepto más amplio, consisten en el riego deliberado y sistemático con menos agua de la que necesitan los cultivos para su máxima producción y crecimiento. El planteamiento puede establecerse desde dos aspectos diferentes:

- Riego deficitario sostenido: reducción constante durante todo el período de cultivo.
- Riego deficitario controlado (RDC): reducción controlada de los aportes de agua solo en ciertos períodos fenológicos.

El RDC, tal y como se ha aplicado con éxito en los cítricos, consiste en la aplicación de cantidades de agua inferiores a las necesidades máximas teóricas durante períodos determinados del ciclo del cultivo, en los que la producción y la calidad se vean poco (o nada) afectados, y durante el resto del ciclo aplicar el total de dichas necesidades, especialmente en los períodos en los que la producción y/o la calidad son más afectados por la falta de agua.

En los cítricos el RDC ha sido ampliamente estudiado en Clementina de Nules [6]. Los resultados de estas investigaciones determinaron que el periodo más crítico y por lo tanto menos aconsejable para reducir los aportes hídricos es el que abarca la floración y el cuajado, donde un estrés hídrico, incluso moderado, suele

reducir sensiblemente la cosecha final por un menor número de frutos recolectados. Del mismo modo, se desaconseja imponer estrés hídrico durante el otoño ya que puede reducir el tamaño final de la fruta. El periodo idóneo para ahorrar agua es, por tanto, el verano (meses de julio y agosto) cuando pueden reducirse moderadamente los aportes hídricos sin afectar la cosecha final ni el tamaño de la fruta. Esto es así ya que, al volver el riego al 100 % de las necesidades durante los meses de otoño y, con frecuencia gracias a las lluvias que normalmente ocurren en este periodo, los frutos son capaces de recuperar el crecimiento perdido durante la época de recorte de riego y alcanzar un tamaño muy similar o igual al de los árboles bien regados durante todo el tiempo. Así pues, restringir los aportes de riego, aproximadamente al 50 % de las necesidades potenciales del cultivo, exclusivamente en julio y agosto, puede permitir obtener ahorros de agua anuales de alrededor de un 20 %, sin mermas en la cantidad ni del valor de la cosecha. Todo ello ha sido corroborado incluso en ensayos de larga duración (5 años) en los que tampoco se detectaron efectos negativos sobre el cultivo a largo plazo [7].

3.3. Calidad del agua de riego.

Otro aspecto a tener en cuenta, además de la disponibilidad en la cantidad de agua, es la calidad de la misma y, en particular, el nivel de conductividad eléctrica (CE). Así pues, muchos de los conceptos y aplicaciones que se desarrollan en este manual sobre programación del riego son de aplicación cuando el agua tiene una baja CE, por ejemplo, inferior a 1,2 dS/m. Si el agua que se emplea para riego tiene una CE mayor de 2 dS/m y, concretamente, cuando el suelo o el clima no favorecen que haya un drenaje natural de iones y cationes acumulados en la rizosfera, el cultivo de los cítricos es mucho más sensible al riego deficitario. Además, los protocolos de riego basados en evitar pérdidas de agua por percolación profunda, no pueden aplicarse en el caso de aguas de riego de elevada salinidad donde es necesario llevar a cabo un drenaje ocasional mediante fracciones de lavado.

En este sentido, uno de los principales efectos adversos de la salinidad es la posible acumulación de iones Cl en las hojas provocando una necrosis de las mismas. Por tanto, hay que tener en cuenta diversos factores que influyen en el desarrollo de la fisiopatía que se pueden agrupar en las cinco clases siguientes:

- i. El patrón sobre el que se injerta la variedad.
- ii. El tipo de suelo, principalmente su estructura y porosidad.
- iii. La naturaleza de los fertilizantes, principalmente su contenido en cloruro.
- iv. La calidad de las aguas de riego, principalmente su contenido de cloruro.
- v. El clima, principalmente la insolación y las lluvias.

4. Estado nutricional.

Conseguir una alta producción con una óptima calidad del fruto sólo es posible a través de un manejo de la fertilización que aporte *dosis* ajustadas de nutrientes en el *momento* correcto, pilares básicos de un programa de fertilización. Conocer el estado nutricional de la planta, por tanto, es vital para averiguar si se está realizando un programa de abonado correcto y corregirlo, en caso de que fuera necesario.

4.1. Nutrientes esenciales.

Aproximadamente el 95 % de la materia seca de las plantas está formada por carbono, hidrógeno y oxígeno fijados por las plantas mediante la fotosíntesis o absorbidos del agua del suelo. Los nutrientes minerales, absorbidos mayoritariamente por las raíces de las plantas y, en menor medida, por las hojas, representan el 5 % restante y son los que se denominan nutrientes esenciales. Todos ellos deben de ser contemplados en un correcto plan de fertilización.

Un nutriente se considera esencial si una planta no puede completar su ciclo de vida en su ausencia, al estar involucrado en funciones metabólicas o estructurales en las que no pueden ser sustituido, como es el caso del fósforo (P) constituyente de la molécula de ATP o el magnesio (Mg) componente de la molécula clorofila. Además, su deficiencia se asocia a síntomas específicos, aunque no inconfundibles [8].

Según las cantidades necesarias para el crecimiento de las plantas (desde fracciones de miligramo hasta gramos por kilogramo de materia seca), los nutrientes esenciales se clasifican en (i) macronutrientes principales o primarios como el nitrógeno (N), P y potasio (K), (ii) macronutrientes secundarios que incluyen el calcio (Ca), Mg y azufre (S) y (iii) micronutrientes, tales como hierro (Fe), manganeso (Mn), zinc (Zn), boro (B), cobre (Cu), cloruro (Cl), molibdeno (Mo) y níquel (Ni). La diferencia entre ellos es la cantidad requerida por la planta. Estos elementos son absorbidos por las plantas como NO_3^- , NH_4^+ , NO_x , NH_3 , H_2PO_4^- , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , SO_2 , H_2S , Fe^{2+} , Cu^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} , H_3BO_3 , Cl^- , MoO_4^{2-} , y Ni^{2+} .

La tabla 1 muestra la concentración promedio de los nutrientes esenciales en material vegetal de plantas superiores.

Tabla 1. Concentración promedio en material vegetal de los nutrientes esenciales.

Macronutrientes	g por 100 g de materia seca (%)	Micronutrientes	mg por kg de materia seca (ppm)
Carbono	45	Hierro	100
Oxígeno	45	Manganeso	50
Hidrógeno	6	Zinc	20
Nitrógeno	1,5	Boro	20
Fósforo	0,2	Cobre	6
Potasio	1,0	Molibdeno	0,1
Calcio	0,5	Cloro	100
Magnesio	0,2	Níquel	3
Azufre	0,1		

Otros elementos pueden ser también asimilados por las plantas, pero no cumplen con los criterios de esencialidad para ser clasificados como tal [9]. A estos elementos se les denomina compuestos beneficiosos y son cualquier sustancia o compuesto que puede ser favorable para una o más especies de plantas, cuando se aplica de forma exógena, sin ser esencial para su desarrollo. El cobalto (Co), el selenio (Se), el silicio (Si) y el sodio (Na) son elementos que pertenecen a este grupo de nutrientes.

4.1.1. La función de los nutrientes esenciales en la producción cítrica.

El crecimiento y la producción en los cítricos están regulados, en mayor medida que otros nutrientes, por el aporte de N [10] afectando a la tasa fotosintética y, por tanto, a la síntesis de carbohidratos. Además, el N influye en la absorción y distribución de prácticamente todos los otros elementos y es, particularmente, importante durante la floración y el cuajado del fruto.

A pesar del papel estructural del P en el ADN y las proteínas, así como en las reacciones de fosforilación y defosforilación en las células de las plantas necesarias para el crecimiento y la producción de las mismas, el aporte de este elemento no ha recibido la atención necesaria en las últimas décadas. El P participa también en el metabolismo de los azúcares y en los procesos energéticos de la planta. Los diferentes portainjertos juegan un rol importante en la absorción de este elemento por la planta [11].

El K se requiere para el mantenimiento del potencial osmótico de las células, regulando la apertura y cierre de los estomas, jugando un papel esencial en la fotosíntesis. El metabolismo y transporte de carbohidratos, la activación enzimática, al ser coenzima en numerosos enzimas, y la estabilización del pH celular son otros procesos en los cítricos relacionados con la nutrición potásica. Además, su aporte incrementa el tamaño del fruto y el grosor de la corteza [12]. Un exceso en el aporte de K puede dar lugar a pérdidas de cosecha debido a desequilibrios nutricionales marcados por una menor absorción de Ca y Mg [13].

El Ca es el elemento más abundante en peso en los cítricos, y se encuentra mayoritariamente en forma de pectatos formando la pared celular estableciendo uniones estables y, al mismo tiempo, reversibles entre moléculas. Por otro lado, juega una función importante en la división celular y su elongación [14]. Este nutriente regula la permeabilidad de las membranas, la apertura y el cierre de los estomas como mensajero secundario y, también, está relacionado con la calmodulina, proteína que interviene de forma fundamental en la reparación celular tras estreses abióticos y bióticos [8].

El Mg tiene como función más importante ser constituyente del átomo central de la molécula de clorofila. Por otro lado, es cofactor de numerosas enzimas y tiene un papel destacado en el transporte de los carbohidratos vía floemática [15] y en la reducción de especies reactivas de oxígeno como defensa de la planta frente a diferentes estreses [16].

En términos generales, el S no es un elemento clave en la nutrición de los cítricos dado que se alcanza un adecuado aporte de este nutriente con la aplicación de fertilizantes nitrogenados, fosforados y micronutrientes, así como con algunos plaguicidas que contienen azufre. Este elemento es un componente importante de algunos aminoácidos, como la cisteína, la cistina, y de la coenzima A.

Los cítricos requieren un aporte adecuado y suficiente de microelementos para una elevada producción y un correcto desarrollo vegetativo. Muchos de los desórdenes nutricionales en el cultivo de los cítricos están asociados específicamente con deficiencias de Fe, Mn y Zn [17]. En general, las deficiencias de Fe, Mn y Cu dañan el sistema fotosintético de los cítricos, mientras que el B y el Zn son vitales en el crecimiento meristemático [18]. Numerosos sistemas enzimáticos son también regulados por micronutrientes (Fe, Zn, Mn, Cu y Ni), como el sistema antioxidante que conforman la primera línea de defensa contra daños ocasionados por las especies reactivas de oxígeno.

Asimismo, el Fe, a pesar de ser un elemento relativamente abundante en una gran cantidad de suelos, su deficiencia (común en suelos básicos) reduce el rendimiento y la calidad del fruto [19]. En cuanto al B se ha estudiado que una correcta aplicación de este elemento influye en una óptima absorción de agua e intercambio de gases por las plantas [20]. Además, se ha revisado la importancia del Mo en el manejo de los nutrientes para la producción de cítricos [21]. En este sentido, se ha observado que aplicaciones foliares de Mo aumentan la eficiencia de asimilación del nitrato como resultado del incremento de la actividad de la nitrato reductasa en hojas y raíces. El Cl mejora la transferencia de electrones del agua a la clorofila durante la fotosíntesis y podría actuar como un contra-ion en los flujos de K involucrados en la turgencia de la planta. Por último, no existen muchos estudios que evalúen los efectos de ellos en la floración de los cítricos; sin embargo, todos ellos son importantes en el incremento de la floración y en la calidad de fruto [22].

4.2. Herramientas actuales para conocer el estado nutricional de las plantas.

Con el objetivo de garantizar un uso eficiente de los nutrientes desde un punto de vista energético, económico y medioambiental, se necesitan herramientas de diagnóstico dirigidas a evitar la deficiencia o el exceso de nutrientes en los cultivos. El diagnóstico de problemas nutricionales potenciales debería ser una práctica rutinaria en el manejo de las parcelas. Este puede conocerse a través del análisis foliar, de flor o frutos y savia o tronco, del diagnóstico visual o del uso de herramientas de agricultura de precisión. Varios autores han defendido el análisis de otros órganos vegetales, como flores [23] o frutos [24], sin embargo, no existe un consenso para aprobar los valores de referencia de esos órganos como la base más adecuada para el manejo de la fertilización [25].

4.2.1. Diagnóstico nutricional mediante análisis foliar.

El análisis foliar, en combinación con el análisis químico del suelo, es una herramienta muy útil para evaluar el equilibrio nutricional de las plantas, además, de entre todos los órganos descritos es el de más fácil muestreo. El análisis foliar se basa en cuatro hipótesis [26] (i) la hoja es el principal órgano del metabolismo de la planta, (ii) los cambios en el aporte de nutrientes y su absorción se reflejan en la composición de los diferentes órganos, como la hoja o su pecíolo, (iii) los cambios son más pronunciados en ciertas etapas de desarrollo, y (iv) la concentración de los nutrientes en la hoja en una etapa de crecimiento específica está relacionada con el rendimiento del cultivo. Por lo tanto, dentro de ciertos límites, el aumento en la concentración de los nutrientes está relacionado con un mayor crecimiento o productividad. Por tanto, su análisis [27]:

- Determina si la planta ha tenido suficiente aporte de un determinado elemento.
- Confirma deficiencias, toxicidades o desequilibrios nutricionales.
- Identifica toxicidades y deficiencias ocultas cuando los síntomas visibles no aparecen.
- Evalúa la eficacia de los programas de fertilización.
- Proporciona un modo de comparar numerosos tratamientos fertilizantes.
- Determina la disponibilidad de elementos que no pueden ser testados por otros métodos.

El procedimiento para el análisis foliar se ha estandarizado con el objetivo de lograr comparaciones e interpretaciones adecuadas, definiendo el *tipo de hoja* a analizar y el *momento* adecuado para realizar el muestreo. Solo así se conseguirá un análisis químico fiable y una interpretación de los resultados sólida que permitirá un correcto ajuste de los programas de fertilización.

En los cítricos se producen tres brotaciones durante el ciclo vegetativo anual, brotación vegetativa y floración de primavera, brotación vegetativa de verano y de otoño (Figura 5). De estas tres, las hojas de la brotación de primavera se han seleccionado para el análisis foliar, debido a que presentan una mayor reserva de nutrientes móviles comparado con las otras dos brotaciones que serán re-movilizados durante el desarrollo de los nuevos órganos vegetativos.

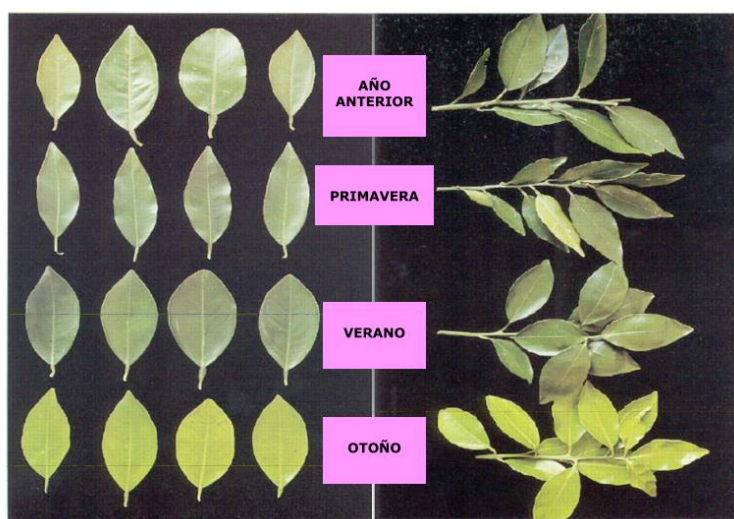


Figura 5. Brotaciones vegetativas de los cítricos (Foto cedida por F. Legaz).

La Figura 6 muestra la diferente concentración de nutrientes en hojas de las distintas brotaciones, mostrando la importancia de seleccionar correctamente la hoja a muestrear.

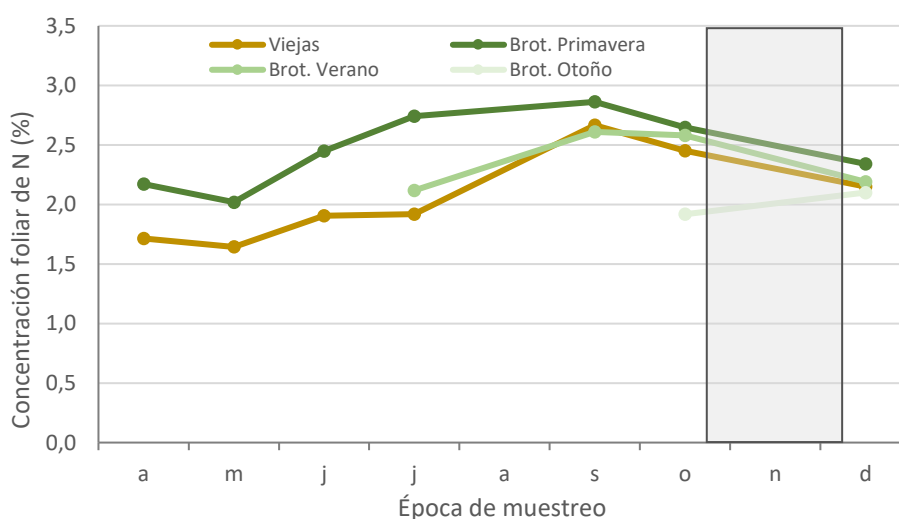


Figura 6. Cambios en la concentración foliar de nitrógeno en hojas de las diferentes brotaciones de naranjo Navel injertado sobre citranje Carrizo. El rectángulo gris muestra la concentración de las hojas en el momento seleccionado para el muestreo foliar.

En cuanto a la época de muestreo, se debe seleccionar el momento en el que las concentraciones de nutrientes sean relativamente estables. En este cultivo, las concentraciones de los diferentes nutrientes son más estables en hojas de 6 a 8 meses de edad (Figura 6), durante el mes de noviembre en nuestras condiciones de cultivo; por lo que este momento es el período más adecuado para el muestreo foliar ([28], [10], [25]).

Además, es de gran importancia no solo que las hojas tengan la misma edad, sino que también se hayan desarrollado de la misma manera ya que la presencia de flores o frutos pequeños en crecimiento en una rama disminuye significativamente las concentraciones de nutrientes de las hojas, ya que los nutrientes se han translocado desde los órganos de reserva (hojas de la brotación de primavera) a esos órganos sumidero ([28]; [29]). La concentración de nutrientes en las hojas de la brotación de primavera sin fruto terminal se utiliza para indicar el estado nutricional de los árboles en EEUU., Australia y España; mientras que las concentraciones de nutrientes de las hojas de brotes fructíferos se utilizan en Brasil y Sudáfrica (Tabla 2). Es importante conocer la hoja muestreada dado que la interpretación de los resultados del análisis foliar se basa en rangos de concentraciones establecidos en tipos de hojas particulares.

Tabla 2. Concentraciones foliares óptimas de nutrientes en cítricos.

Nutriente	Brasil ^{1,3}	China ^{2,4}	India ^{2,5}	Sudafrica ^{1,6}	España ^{2,7}	USA ^{2,8}
	g kg ⁻¹					
N	25-30	24-26	20-24	20-27	28-30	25-27
P	1,2-1,6	1,3-1,5	0,9-1,7	1,1-1,6	1,3-1,6	1,2-1,6
K	12-16	-	11-18	7-15	7,1-10	12-17
Ca	35-50	34-48	17-30	35-55	30-50	30-49
Mg	3,5-5,0	2,0-2,9	3,2-6,9	3,0-5,5	2,5-4,5	3,0-4,9
S	2,0-3,0	2,3-2,5	-	-	2,0-3,0	-
	mg kg ⁻¹					
Fe	50-150	40-46	53-137	80-300	61-100	60-120
Mn	35-70	14-23	42-87	30-150	26-60	25-100
Zn	50-75	23-30	12-29	20-70	26-70	25-100
B	75-150	17-19	-	50-150	31-100	36-100
Cu	10-20	3,7-10	4-16	5-16	6-14	5-16
Mo	0,5-2,0	-	-	-	0,1-3,0	0,1-2,0

(¹) basado en análisis de hojas de 4 a 6 meses de edad de la brotación de primavera con fruto terminal de 2 a 4 cm de diámetro.

(²) basado en análisis de hojas de 4 a 6 meses de edad de la brotación de primavera sin fruto terminal.

(³) adaptado de Quaggio et al. (2010).

(⁴) adaptado de Srivastava and Singh (2004).

(⁵) adaptado de Srivastava (2013).

(⁶) adaptado de Du Plessis and Koen (1996).

(⁷) adaptado de Quiñones et al. (2012).

(⁸) adaptado de Obreza et al. (2008b).

-: dato no disponible.

La tabla siguiente muestra los niveles foliares de referencia establecidos en cítricos de diferente variedad basadas en hojas de la brotación de primavera sin fruto terminal muestreadas en noviembre [30].

Tabla 3. Niveles foliares de referencia de macro y micronutrientes en cítricos.

		% (peso seco)				
Nivel		Muy bajo	Bajo	Normal	Alto	Muy alto
Naranjos	N	<2,30	2,31-2,50	2,51-2,80	2,81-3,00	>3,00
	P	<0,10	0,11-0,12	0,13-0,16	0,17-0,20	>0,20
	K	<0,50	0,51-0,70	0,71-1,00	1,01-1,30	>1,30
Clementinos	N	<2,20	2,21-2,40	2,41-2,70	2,71-2,90	>2,90
	P	<0,08	0,09-0,11	0,12-0,15	0,16-0,19	>0,19
	K	<0,50	0,51-0,70	0,71-1,00	1,01-1,30	>1,30
Satsumas	N	<2,40	2,41-2,60	2,61-2,90	2,91-3,10	>3,10
	P	<0,10	0,11-0,12	0,13-0,16	0,17-0,20	>0,20
	K	<0,40	0,41-0,60	0,61-0,90	0,91-1,15	>1,15
Limonos	N	<2,10	2,11-2,30	2,31-2,80	2,81-3,00	>3,00
	P	<0,09	0,10-0,11	0,12-0,16	0,17-0,20	>0,20
	K	<0,90	1,00-1,20	1,21-1,60	1,61-1,80	>1,80
Naranjos, Clementinos, Satsumas, Limonos	Mg	<0,15	0,15-0,24	0,25-0,45	0,46-0,90	>0,90
	Ca	<1,60	1,60-2,99	3,00-5,00	5,01-6,50	>6,50
	S	<0,14	0,14-0,19	0,20-0,30	0,31-0,50	>0,5
		ppm (peso seco)				
Naranjas Clementinos Satsumas Limonos	Fe	<35	35-60	61-100	101-200	>200
	Zn	<14	14-25	26-70	71-300	>300
	Mn	<12	12-25	26-60	61-250	>250
	B	<21	21-30	31-100	101-260	>260
	Cu	<3	3-5	6-14	15-25	>25
	Mo	<0,06	0,06-0,09	0,10-3,00	3,10-10,00	>10,00

4.2.2. Diagnóstico nutricional mediante análisis visual.

Los síntomas visuales de los trastornos nutricionales se identifican típicamente en las hojas cuando el problema es agudo debido a lesiones moleculares y cambios subcelulares que conducen a deformaciones celulares y tisulares. Son útiles como ayuda para interpretar el diagnóstico del estado nutricional de los cítricos, sin embargo, pueden confundirse fácilmente si la deficiencia y la toxicidad resultan de la concentración alterada de más de un elemento en las plantas. Además, cuando la deficiencia o el exceso se observan de forma visual, el desarrollo del árbol y el rendimiento ya se han visto afectados.

La localización de las alteraciones (hojas jóvenes o viejas) ayuda también a conocer el elemento deficiente o excesivo. Si el trastorno nutricional aparece en hojas viejas, la carencia proviene de un elemento móvil, como son el N, P, K, Mg y Mo. Si, por el contrario, aparece en hojas jóvenes, se trata de elementos no móviles como el S, Fe, Mn, Cu y, en algunos casos, el Zn. Si aparecen en yemas terminales suelen estar asociados a Ca y B.

La deficiencia de nitrógeno se caracteriza por una reducción del tamaño de las hojas y un amarilleamiento general de éstas, más acusado en los nervios. Particularmente intensos son estos síntomas en las hojas de los brotes con fruto. Los frutos que alcanzan la madurez suelen ser de menor tamaño, con la corteza muy fina y de buena calidad.

La carencia de fósforo es muy difícil de detectar en campo, no sólo porque no es frecuente en las plantaciones de cítricos, sino porque no presenta manifestaciones claras. En las plantas deficientes en este elemento la floración es más escasa, los frutos son de mayor tamaño pero con menos zumo, corteza más gruesa y menos consistentes.

Los síntomas de carencia del potasio son poco visibles y específicos, precisándose de análisis foliares para su detección. Afectan, sobre todo, a las hojas viejas, dada la movilidad de este elemento en la planta, que se arrugan y enrollan. Los frutos son pequeños y con la corteza delgada y suave, que tiende a colorear prematuramente.



Figura 7. Sintomatología visual de deficiencia de nitrógeno (izda.), fósforo (central) y potasio (dcha.) en cítricos.

La carencia del magnesio se manifiesta por un amarilleamiento de la hoja, principalmente las viejas, que no alcanza toda la superficie, queda una “V” rellena de color verde, con su vértice apuntando hacia el ápice de la hoja. La deficiencia de Mg produce frutos de menor tamaño, con una corteza más delgada, menor contenido en azúcares y acidez total.

Los síntomas más característicos de la deficiencia de calcio son la reducción del desarrollo, pérdida de vigor, desecación de las puntas de las ramas y defoliaciones. El rendimiento de la cosecha y el tamaño del fruto pueden verse ligeramente reducidos en estas condiciones.



Figura 8. Sintomatología visual de deficiencia de calcio (izda.) y magnesio (dcha.) en cítricos.

En plantas con carencia de azufre se observa un comportamiento similar a la carencia de nitrógeno. Las hojas presentan un color verde pálido, pero además se produce un encorvamiento de las puntas de las hojas, que avanza hacia la base.

Dada la falta de movilidad del hierro por la planta para movilizarse desde las hojas viejas, la carencia de hierro se manifiesta por la tonalidad amarilla que adquieren las hojas de las brotaciones jóvenes, excepción hecha de sus nervios que permanecen verdes. Además, se reduce el número y tamaño final de los frutos, así como el contenido en sólidos solubles totales.

La deficiencia de zinc se caracteriza por la formación de zonas amarillentas alrededor de los nervios secundarios de las hojas que destacan sobre un fondo verdoso. En estados graves, las hojas, principalmente las jóvenes, alcanzan un tamaño inferior al normal. Además, la cosecha se reduce y los frutos son de menor tamaño, con la corteza fina, poco zumo y baja concentración de sólidos solubles.

La deficiencia de manganeso se caracteriza por la aparición de lagunas amarillas, relativamente irregulares en su forma y distribución, sobre las hojas jóvenes, pero sin alterar su tamaño ni forma. Suelen coexistir con las carencias de Zn.



Figura 9. Sintomatología visual de deficiencia de hierro (izda.) y de zinc y manganeso (dcha.) en cítricos.

La carencia del cobre en los cítricos es difícil de encontrar, ya que los tratamientos fungicidas que se aplican en su cultivo son suficientes para cubrir las necesidades de los árboles.

Los síntomas de carencia del boro son poco específicos, siendo los más relevantes manchas traslúcidas, amarilleamiento de nervios, de formación y color bronceado de las hojas jóvenes y bolsas de goma en el albedo de frutos.

La carencia de molibdeno en los cítricos trae consigo una sintomatología muy parecida a la falta de N. Además, se manifiesta por una escasa cantidad de hojas y éstas tienden a curvarse hacia arriba.



Figura 10. Sintomatología visual de deficiencia de boro (izda.) y de molibdeno (dcha) en cítricos.

No se conocen los síntomas de la deficiencia de cloro y níquel en plantas de cítricos y suelen aparecer, en mayor medida, daños por exceso de estos elementos.

4.2.3. Herramientas de agricultura de precisión para el diagnóstico nutricional.

En los últimos años, la teledetección se ha convertido en una herramienta esencial para el desarrollo de la agricultura de precisión. Una de sus aplicaciones más relevantes sería para determinar el estado nutricional de los cultivos a lo largo del ciclo fenológico con el objetivo de optimizar los planes de fertilización. Estas metodologías permitirían el diagnóstico foliar sin necesidad de análisis foliares que requieren medidas destructivas, no inmediatas, que generan un coste elevado para el agricultor.

En este sentido, los sensores ópticos de teledetección se presentan como una alternativa importante al análisis foliar. Estos miden la energía electromagnética reflejada o emitida por la vegetación (firma espectral) en diferentes longitudes de onda, que dependen de los componentes bioquímicos de las plantas (contenido agua, concentración de clorofila u otros pigmentos, nitrógeno, etc.). La presencia o ausencia de estos componentes produce cambios en el tejido que son potencialmente detectables por estos dispositivos, lo que permite descubrir de manera temprana los efectos fisiológicos y bioquímicos causados por un mal estado nutritivo.

Los métodos de detección que se están desarrollando y utilizando en la actualidad son:

- Los medidores de clorofila como el SPAD-502 o el CCM-200 (Apdo. 6.5.2)
- El índice vegetativo diferencial normalizado (NDVI) (Aptdo. 6.5.3) se utiliza para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación.
- El índice normalizado de borde rojo (NDBR) es sensible al contenido de clorofila en las hojas que, en algunos cultivos, está relacionado con el contenido en N y Fe.
- La tecnología en el infrarrojo cercano (NIR) se relaciona en cítricos con nutrientes como el nitrógeno, el cloro o el potasio.

4.3. Procedimiento para el muestreo foliar.

4.3.1. Criterios para la selección de los árboles a muestrear.

En la realización del muestreo foliar se han de seguir los siguientes criterios:

- La subparcela a muestrear deben de ser unidades con condiciones edáficas homogéneas, arbolado uniforme y misma combinación variedad/portainjerto.
- El tamaño de muestra estará en función del número de árboles en cada subparcela (Tabla 4) y, como mínimo, debe constar de unas 100 hojas tomadas de ramas no fructíferas de 15 a 20 árboles uniformes que han recibido el mismo programa de fertilizantes.

Tabla 4. Relación de los árboles a muestrear en función del tamaño de las parcelas.

Nº árboles/subparcela	Nº árboles a muestrear
< 150	1/3
150-250	1/5
250-450	1/9
450-750	1/15
750-1500	1/30
1500-2500	1/50

- Utilizar bolsas de papel limpias para almacenar la muestra. Etiquetar las bolsas con un número de identificación al que se puede hacer referencia cuando se reciben los resultados analíticos.
- Evitar hojas inmaduras debido a que cambian rápidamente de composición.
- No muestrear árboles de apariencia anormal, situados en el borde de las parcelas o al final de las filas porque pueden estar recubiertos con partículas de tierra y polvo.
- No incluir hojas enfermas, dañadas por insectos, muertas ni con tratamiento foliar reciente.
- Seleccionar al menos una hoja de las cuatro orientaciones del árbol (completamente expandidas) y muestreadas con pecíolo incluido.
- En casos especiales para el diagnóstico de desórdenes nutricionales, recolectar muestras tanto de árboles afectados como de árboles normales. Los árboles seleccionados para el muestreo de comparación deben de ser de misma edad y combinación variedad/portainjerto y, si es posible, árboles lo más cercanos entre sí.
- Si el traslado al laboratorio no puede hacerse de inmediato, mantenerlas refrigeradas a 5º C (no congelar) hasta su envío, en un período no superior a 3 días.

4.3.2. Lista de verificación para el análisis foliar para el diagnóstico nutricional.

Como guía para realizar el programa de diagnóstico foliar se han de tener en cuenta los siguientes puntos:

- Un análisis foliar es más eficaz si se realiza anualmente.
- El análisis foliar es útil para un correcto abonado si se realiza para todos los elementos esenciales.
- Utilice los procedimientos de muestreo estándar establecidos para hojas descrito en este capítulo.
- Tenga en cuenta que los residuos de aerosoles o el polvo en la superficie de las hojas afectan los resultados de la muestra; lavar las hojas para obtener un análisis preciso. Evite tomar muestras de árboles que hayan recibido recientemente una aplicación foliar de cualquier índole.

5. Requisitos de la instalación de riego para aplicar AP.

La inversión público-privada durante los últimos años ha supuesto una importante modernización de las redes de riego a presión y muchas instalaciones de riego están dotadas de elementos (sensores, contadores, electroválvulas, programadores, etc.) que automatizan el sistema y facilitarán la implementación de AP. Sin embargo, se requieren unos requisitos mínimos, sin los cuales no tiene sentido el uso de nuevas tecnologías en una explotación agrícola. Desde un inadecuado diseño agronómico en parcela, con su correspondiente selección de emisores (tipo, caudal, etc.), y llegando hasta la incorrecta operación del sistema de bombeo, comprometen cualquier potencial mejora en la explotación. Partimos, por tanto, de instalaciones correctamente diseñadas, ejecutadas y gestionadas por técnicos y especialistas competentes; se destacan algunas ideas a tener en cuenta:

Subunidad de riego: Se entiende como subunidad de riego el conjunto de emisores y laterales, que agrupados bajo una tubería terciaria y un elemento de regulación, abastecen una parcela. Una alta uniformidad de distribución de agua, y por tanto de los nutrientes que pueda transportar, asegura que todas las plantas de esa parcela reciban un mismo volumen por riego. Goteros de mala calidad, diferencias elevadas de presión, presión en los emisores incorrectas o un mal manejo de la instalación (p.e. falta de limpieza, filtración o aguas de mala calidad que provoquen obturaciones de los emisores) son las causas principales de que no se alcance una buena uniformidad. Para evaluarla existen diferentes coeficientes que pueden medirse en campo, pudiendo determinarse si la subunidad de riego a presión funciona correctamente. En cualquier caso, la subunidad de riego, que sería equivalente a la unidad mínima de operación en una red, debe garantizar un riego homogéneo.

Red de distribución: La red de distribución transporta el agua a presión desde el punto de suministro a cada una de las parcelas o subunidades. Para ello existen una serie de derivaciones o tomas en la red, que pueden ser independientes para cada parcela o usuario o estar agrupadas; este último caso define los hidrantes multiusuario. La red debe estar dimensionada y equipada (bombas, filtros, válvulas, automatismos, etc.) adecuadamente, de manera que se garantice la presión y el caudal necesario en cada toma. Si se aplica fertirriego desde el cabezal comunitario, también será necesario un sistema de inyección de la solución nutritiva que sea versátil y permita particularizar la dosificación. Es preciso que todos los elementos de la red estén bien identificados y se conozca su comportamiento hidráulico, haciendo hincapié en los sistemas de bombeo, puesto que van a requerir aporte de energía eléctrica.

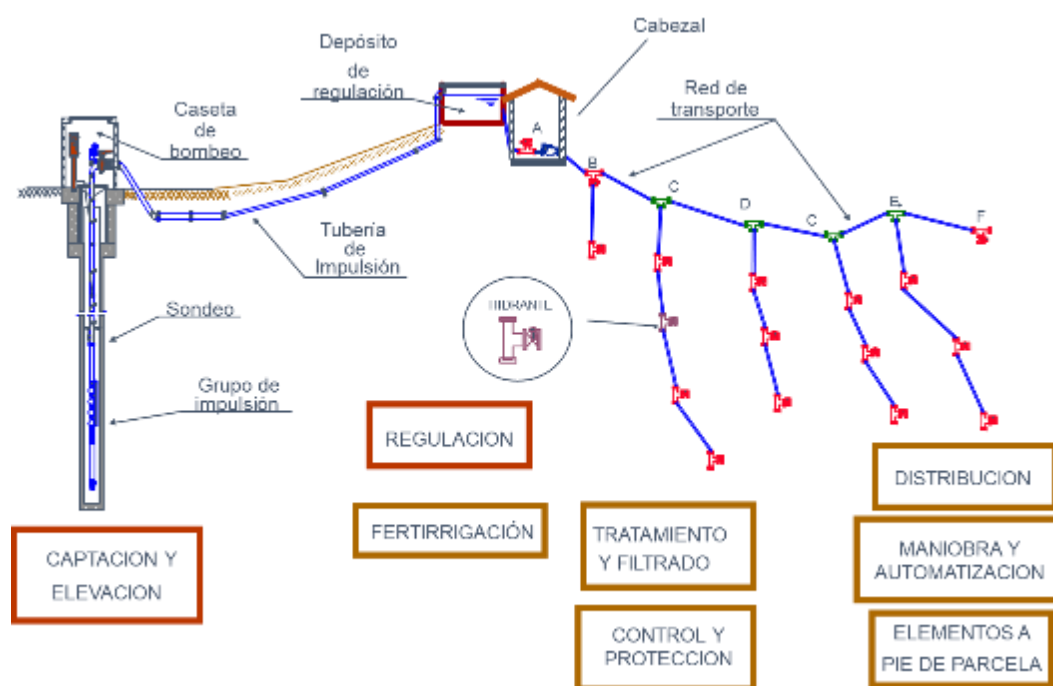


Figura 11. Elementos de una red de riego (ejemplo en red por gravedad alimentada desde sondeo) [31].

En una red comunitaria el reparto del agua de riego puede hacerse “a la demanda” o por “turnos” (o sectores). En el primer caso, es el usuario final quien decide y opera el momento y la duración del riego, suponiendo una organización totalmente flexible. En un riego por turnos, el riego se programa centralizadamente y son los

técnicos o gestores de la red quienes determinan las tomas que están abiertas en cada sector, funcionando ordenada y secuencialmente y agrupando de forma fija y predeterminada la frecuencia y tiempos de riego. Para poder organizar por turnos una red es preciso que existan electroválvulas, que pueden situarse a nivel de toma, hidrante o sector, según las particularidades de cada red. El número de electroválvulas será mucho mayor si la automatización es hasta nivel de toma (o parcela); sin embargo, se tiene la capacidad de operar sobre una parcela determinada, lo cual desaparece para agrupaciones superiores de automatización (electroválvula por hidrante multiusuario o sector). En una red a la demanda no es preciso que existan electroválvulas, al ser el usuario quien abre o cierra su instalación a voluntad. Por el contrario, tanto realizar fertirriego comunitario (si se quieren aplicar dosis diferenciadas), como el manejo hidráulico de la red se hace más complejo.

6. Tecnologías.

Este apartado no pretende ser una revisión detallada de técnicas y equipos aplicables en riego y fertilización de precisión; como se ha comentado con anterioridad, se describen de manera sucinta las tecnologías que se han encontrado apropiadas para su uso en el marco del proyecto.

6.1. Estaciones agrometeorológicas.

El agua, junto con los elementos disueltos, es absorbida del suelo por las raíces y conducida hasta las hojas a través de la xilema, que es el sistema vascular encargado del transporte de la savia bruta. Una vez en las hojas, se efectúan los procesos metabólicos de la fotosíntesis por los cuales, y gracias a la fuente energética que proporciona la componente lumínica de la radiación solar, el CO₂ atmosférico, la propia agua y los elementos contenidos en ella, se sintetiza la savia elaborada que contiene los nutrientes asimilables y que son distribuidos de nuevo por todo el cuerpo de la planta (a través del floema) para su mantenimiento y desarrollo.

Sin embargo, no toda el agua absorbida por las plantas pasa a formar parte de sus órganos. En efecto, podemos advertir de la existencia de un sistema continuo suelo-planta-atmósfera en el cual el agua se desplaza en el suelo hacia la superficie de la raíz y hasta las hojas donde se produce el cambio de estado de líquido a vapor. Gracias a este continuo, en el que la planta actúa como un elemento conductor, se vierten a la atmósfera grandes cantidades de agua en forma de vapor cuyo origen es el suelo. Si logramos cuantificar esta “pérdida” de agua del suelo, seremos capaces de restablecer el equilibrio con solo reponer en el suelo dicha cantidad de agua y, por lo tanto, haber adoptado una programación de riego más precisa respecto de las necesidades de nuestro cultivo.

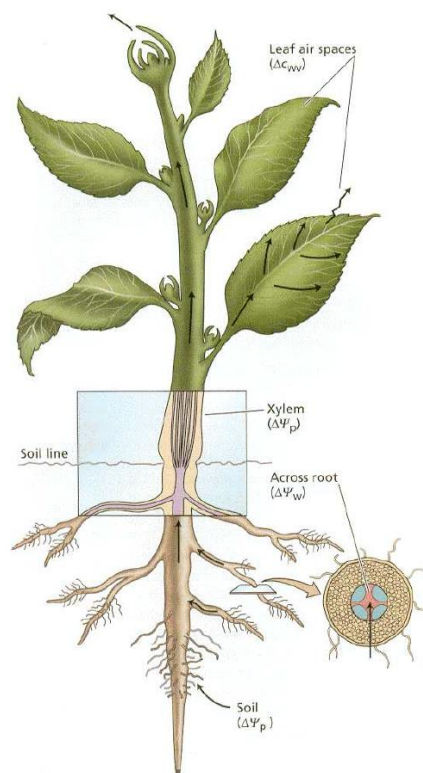


Figura 12. Sistema continuo suelo-planta-atmósfera [32].

6.1.1. La evapotranspiración de referencia (ET_0).

Las condiciones meteorológicas son parte responsable del régimen de funcionamiento del continuo suelo-planta-atmósfera. El tiempo atmosférico ocurrido en un determinado periodo (temperatura, humedad, viento, y radiación solar) va a determinar, en primera instancia, el grado en el que un importante flujo de agua en forma de vapor vuelva a la atmósfera, bien directamente desde el suelo por evaporación, o bien a través del cuerpo de la planta por transpiración. Esta demanda atmosférica se evalúa a través de un parámetro indirecto que recibe el nombre de evapotranspiración de referencia (ET_0). Se expresa normalmente en milímetros y representa el consumo de agua que realiza un cultivo de gramíneas de 15 a 20 cm de altura, en crecimiento activo, que sombrea totalmente el suelo y que no padece limitación alguna de agua. Como la superficie de gramíneas permanece siempre en condiciones óptimas, no existe la influencia de la variable planta y por tanto se puede decir que la ET_0 solamente se ve influenciada por las variables ambientales.

Para el cálculo de la ET_0 se han propuesto diversas fórmulas empíricas, basadas en parámetros ambientales. Nos referiremos aquí a los cuatro métodos que inicialmente propuso la FAO en su publicación 24 “Las necesidades de agua de los cultivos” [33] y que tradicionalmente han sido los más utilizados:

1. **BLANEY-CRIDDLE:** Presupone que la ET_0 es proporcional al producto de la temperatura por el porcentaje de horas sol diarias anuales del periodo considerado, normalmente un mes. Es adecuado, por tanto, cuando la temperatura sea la única variable climatológica de que se dispone.
2. **RADIACIÓN:** Se basa en el hecho de que la insolación es la fuerza motriz de la evapotranspiración y toma en cuenta, también, la temperatura.

3. FAO-PENMAN-MONTEITH: Apropiado para el caso de que se tenga registros climatológicos de temperatura, humedad, velocidad del viento e insolación.
4. CUBETA CLASE A: Sencillo método que integra la influencia de la temperatura, humedad, velocidad del viento e insolación a través de la evaporación de una superficie de agua libre de un tanque evaporimétrico de medida y colocación estándar.

La más aceptada es la conocida como FAO-Penman-Monteith debido, por una parte, a que contempla un amplio espectro de variables meteorológicas y, por otra, es la más robusta en la estimación de la ET_0 en distintas condiciones climáticas.

Naturalmente, para el cálculo de la ET_0 , debemos disponer de datos meteorológicos, y tanto será mejor el cálculo cuanto mejor sea la calidad de los datos y estos provengan de estaciones meteorológicas cuyo objetivo sea expresamente la evaluación de la evapotranspiración de referencia.

6.1.2. Estaciones en red (Red SIAR)

Ese precisamente es el objetivo del Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SiAR). La red SiAR es una infraestructura que captura, registra y divulga los datos agroclimáticos necesarios para el cálculo de la demanda hídrica de las zonas de riego. Por ello, permite obtener información útil, rigurosa y de calidad, que contribuye a una mejor planificación, gestión, manejo y control de las explotaciones de regadío.

El SIAR se estructura en tres niveles: más de 450 estaciones agroclimáticas automáticas, 12 Centros Zonales y un Centro Nacional. El Centro Nacional, dependiente de la Subdirección General de Regadíos e Infraestructuras Rurales del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, tiene como labor el almacenamiento de toda la información recogida diariamente en cada uno de los Centros Zonales, la explotación y divulgación de dicha información a nivel nacional, así como la coordinación general del sistema. Los Centros Zonales, de carácter autonómico, aportan a la red más de un centenar de estaciones propias, colaboran en el correcto funcionamiento de la red y realizan la validación de la información procedente de las estaciones. Esta labor cooperativa interinstitucional permite que la información ofrecida sea de una alta calidad, situando a la red SIAR como una de las mejores redes meteorológicas de España.

Las estaciones (Figura 13) se componen de un sensor de temperatura-humedad (Sonda T/HR Vaisala, Rotronic o Thies), un sensor de radiación (piranómetro Skye o Kipp & Zonnen), un sensor de velocidad y dirección de viento (anemoveleta R.M.Young o Thies), un pluviómetro (Campbell Scientific o Thies) y un *datalogger* (CR10X, CR800 o CR1000 Campbell Scientific). La información se registra cada media hora y se transmite prácticamente en tiempo real, incorporándose a un software específico de gestión y validación que permite el cálculo de la ET_0 según las metodologías propuestas por la FAO a las que se añade la metodología de Hargreaves.

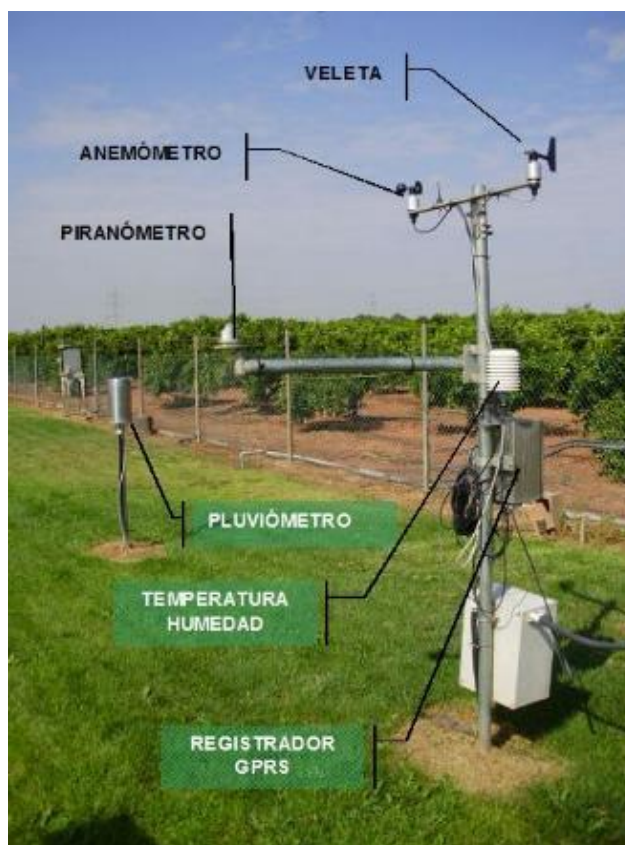


Figura 13. Estación agrometeorológica de la red SiAR-IVIA con sus diferentes elementos.

Las estaciones de la red SIAR tienen estrictos criterios para su ubicación. Las estaciones se emplazan en zonas abiertas, rodeadas de cultivos homogéneos representativas del área de regadío que cubren, sin obstáculos en los alrededores ni diferencias climáticas bruscas. La red es objeto de un completo y estricto programa de mantenimiento que construye la base de la gran calidad de la información ofrecida. Este programa de mantenimiento consta de tres niveles:

1. Mantenimiento correctivo: cuando concurre alguna causa de mal funcionamiento.
2. Mantenimiento preventivo: sencillas labores para garantizar el correcto registro de los datos (limpieza de sensores, desbrozado del recinto, etc.).
3. Calibración: Todas las estaciones son objeto anualmente de la sustitución de sus sensores por otros nuevos o revisados.

6.1.3. Cálculo de necesidades de riego.

La evapotranspiración de referencia constituye la base de la metodología más extendida para el cálculo de las necesidades de riego, conocida comúnmente como *balance de agua*. En esta estimación, el consumo de agua por parte del cultivo se obtiene a partir de la evapotranspiración del cultivo (ETc) que permite cuantificar la cantidad de agua que ha perdido un suelo en unas condiciones ambientales dadas por la presencia de un cultivo en un momento y desarrollo determinados. Este método es el propuesto por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y puede consultarse con detalle en la publicación

de la serie Riego y Drenaje nº 56, Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos [34].

El método del balance hídrico se basa, como ya se ha esbozado al inicio del presente capítulo, en lograr un equilibrio entre las entradas y salidas de agua en el suelo de forma que el cultivo se encuentre en un estado de hidratación adecuado. Si por cualquier causa este equilibrio se rompe, el cultivo sufrirá los efectos negativos de la falta o exceso de agua. En este balance, el factor correspondiente a las salidas se corresponde con la ET_c en exclusiva, es decir, al binomio de agua evaporada en la superficie del suelo y al consumo de agua por parte del cultivo. Para estimar la ET_c , se recurre a su vez al producto de dos componentes: una exclusivamente ambiental, es decir, la mencionada ET_0 , y otra ligada al cultivo denominada coeficiente del cultivo (K_c).

$$ET_c = ET_0 \times K_c$$

En cuanto al cálculo del K_c , la investigación agraria se ocupa de la obtención de coeficientes característicos de los cultivos más extendidos, tradicionalmente mediante la utilización de lisímetros. Respecto del K_c podemos encontrar en la bibliografía dos aproximaciones, la primera es la del coeficiente dual en la que se contemplan por separado la componente transpirativa asociada a los diferentes periodos fenológicos o de desarrollo, - coeficiente basal (K_{cb})- y la componente asociada a la evaporación a través de la superficie del suelo (K_e). La segunda aproximación es la del coeficiente único, en el que ambas componentes se integran en un único valor, al que se denomina por tanto K_c . Normalmente esta última es la más asequible para el técnico agrario ya que es la que con mayor frecuencia podemos encontrar en la bibliografía. El método del coeficiente dual es más preciso, aunque más complejo, por lo que hoy en día aún queda relegado a programación de riego en tiempo real, normalmente asociada a estudios de investigación.

Fuentes de K_c de cultivo hay muchas, tantas que es fácil que el usuario no sepa finalmente cuál elegir. Un buen recurso es utilizar aquellos valores que provengan de estudios realizados en zonas y/o variedades análogas a las que pretendemos extender esta información. En el caso de los cítricos, existe una excelente correlación entre el K_c y el porcentaje de área sombreada por los árboles (PAS) tal y como se expresa en la Figura 14 [35]:

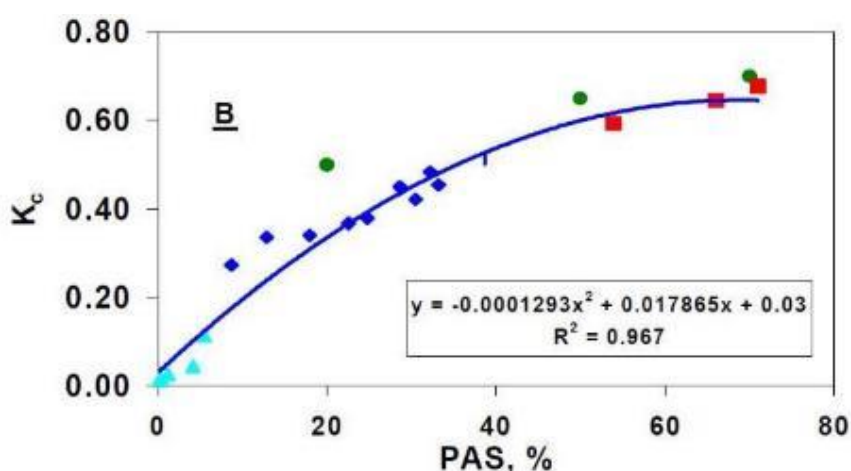


Figura 14. Relación entre el tamaño relativo del arbolado (PAS) y el coeficiente de cultivo (K_c) en cítricos.

En definitiva, esta fórmula significa que, para plantaciones adultas y maduras con PAS mayor del 67 %, deberemos aplicar un Kc de 0,647; en caso contrario, se aplicará la fórmula polinómica.

El segundo ajuste que hay que aplicar, recoge la variación estacional del valor de Kc, con valores mínimos en primavera y máximos en otoño, reflejando principalmente los cambios de área foliar producidos por la habitual poda anual y por el consiguiente crecimiento de las brotaciones de primavera y verano, así como el aumento de la evaporación directa del suelo provocado por las lluvias de otoño e invierno. La tabla 5 recoge los distintos factores mensuales a aplicar al Kc.

Tabla 5. Factores de corrección mensuales del Kc en cítricos

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Otc	Nov	Dic
f _{c mes}	0,971	0,956	0,971	0,912	0,809	0,912	1,00	1,162	1,088	1,235	1,074	0,926

Una vez estimada la componente de pérdida de agua del suelo por parte del cultivo o ET_c, corresponde compensarlas mediante el riego, lluvia o una combinación de ambas. Las necesidades de riego netas (NRN) vienen dadas por la diferencia entre pérdidas y ganancias al sistema, es decir, por la diferencia entre la evapotranspiración de cultivo y la precipitación efectiva:

$$NRN = ET_c - P_{ef}$$

La cantidad de lluvia aprovechada por el cultivo o precipitación efectiva (P_{ef}) depende de diversos factores como la intensidad de la precipitación, la aridez del clima, la pendiente del terreno, el contenido en humedad del suelo, etc. Existe una multitud de métodos de estimación de la precipitación efectiva a los que acudir: USDA SCS, ecuaciones empíricas FAO, precipitación confiable, etc. (https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/gestion-sostenible-regadios/precipitacionefectiva05_tcm30-82980.pdf). Sin embargo, la precipitación efectiva, la que aprovecha realmente el cultivo y que ahorra riego, es un parámetro cuya estandarización para su introducción en el balance de agua arroja muchas incertidumbres y, por lo tanto, puede constituir uno de los talones de Aquiles del método FAO.

Una vez determinadas las necesidades de riego netas, se ha de tener en cuenta la eficiencia en la distribución de la propia instalación y la posible necesidad de aplicar una fracción de lavado en caso de utilizar aguas salinas o tener un cultivo sensible a la salinidad. La eficiencia de la instalación en la distribución de agua (Ef_u) depende de cómo se comporta nuestra instalación y cómo de uniforme es el reparto del agua a todo el cultivo. La falta de uniformidad de aplicación es debida a la diferencia de descarga en los emisores situados en distintos puntos de la subunidad de riego. Para compensar dichas diferencias, se deben aportar cantidades adicionales de agua, de forma que todas las plantas reciban como mínimo la dosis neta de riego. Para su determinación es recomendable realizar una evaluación de la instalación consistente en la medida de caudales y presiones en determinados puntos de la instalación de riego (Norma UNE 15097) [36]. También se puede tomar como referencia valores de 0,80–0,85 para riego por aspersión y de 0,85-0,90 para riego por goteo.

$$NRB = \frac{NRN}{Ef_u}$$

La fracción de lavado (FL) depende de la relación entre la conductividad eléctrica del agua de riego y la del agua de drenaje, si se dispone de ese dato. También puede obtenerse a partir de la conductividad del extracto de saturación del suelo tal que suponga una reducción del 100 % de la producción del cultivo, es decir, de la sensibilidad de una especie a la salinidad.

$$NRB = NRN \cdot (1 + FL)$$

Las necesidades brutas de riego (NRB) se obtendrán del mayor valor resultante de aplicar la Eficiencia de la Instalación y, en su caso, la Fracción de Lavado por salinidad. El valor obtenido se expresa en milímetros de columna de agua o litros por metro cuadrado.

El siguiente paso es transformar el volumen de riego obtenido (NRB) en horas de riego (H riego), que es lo que interesa al técnico de una explotación de cara a programar su riego. Para ello, se debe tener en cuenta la cantidad de agua que se le debe aportar a la planta en su marco de plantación ($a \cdot b$) para obtener el tiempo necesario para cubrir esas necesidades. Ello depende del número de goteros por planta (n) y del caudal de estos (Q).

$$H \text{ riego} = \frac{NRB}{Q \cdot n} \cdot a \cdot b$$

Con esta fórmula se obtendrá el número de horas de riego que el técnico debe programar para el periodo de tiempo considerado. La FAO recomienda que esta programación de riego no vaya más allá de una semana. Si se opera de esta manera, el resultado será las horas de riego semanales.

Todo el sistema descrito hasta este momento se cimenta, para su utilización efectiva por parte del usuario del agua de riego, en toda la red de Centros Zonales que hacen las veces de los conocidos genéricamente como Servicios de Asesoramiento al Regante (SAR). Los SAR ofrecen plataformas online en las que, siempre de manera gratuita, es posible obtener recomendaciones de riego personalizadas.

En la Comunidad Valenciana, el Servicio de Tecnología del Riego (STR) del Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias actúa como Centro Zonal y es el responsable del correcto funcionamiento de las 55 estaciones agroclimáticas diseminadas por todas aquellas zonas donde existe implantación de cultivos bajo riego, de las cuales 10 son propiedad del IVIA. El IVIA a través de su Portal de Riegos (<http://riegos.ivia.es/>) ofrece a sus usuarios la posibilidad de obtener online de manera sencilla las dosis recomendadas de riego personalizadas a sus parcelas. Otros portales con información para el cálculo de necesidades de cítricos pueden encontrarse en las Comunidades Autónomas de: Andalucía (<https://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/ifapa/riaweb/web/>), Murcia (<http://siam.imida.es/>), Canarias (https://www.agrocabildo.org/agrometeorologia_estaciones.asp) o Catalunya (<https://ruralcat.gencat.cat/>).

El balance hídrico descrito anteriormente basado en la demanda atmosférica permite cuantificar las dosis de riego, pero dos preguntas fundamentales quedan aún por responder. ¿Cómo regar? ¿Cuándo regar? La frecuencia y duración de los riegos debe ajustarse teniendo en cuenta el contenido de agua en el suelo y el estado hídrico de la planta con tal de asegurar un uso eficiente y sostenible de los recursos. ¿Qué herramientas

nos pueden proporcionar una pauta orientativa? Principalmente los sensores para la medida del estado hídrico del suelo y de la planta.

6.2. Empleo de sensores de humedad.

6.2.1. Definición y uso.

Son sensores individuales o sondas multisensores, que monitorizan la humedad del suelo (o la humedad, temperatura y salinidad del suelo).

Sirven para programar los riegos determinando cuándo, cuánto y cómo regar. Además, nos pueden proporcionar información sobre:

- Presencia o ausencia de raíces activas.
- Actividad del sistema radicular en el perfil de suelo.
- Hora de inicio y de finalización de la extracción de agua por el cultivo.
- Infiltración de los riegos/lluvia.
- Duración de los riegos.
- Drenaje.
- Extracción desde la capa freática.
- Movimiento no saturado de agua en el suelo.
- Cambio de estado (líquido a sólido) del agua en el suelo por bajada de temperatura.
- Estrés por falta de agua.
- Estrés por exceso de agua.
- Movimiento de fertilizantes.
- Estrategias de riego.

Hay sensores que miden también la temperatura del suelo, lo que aporta información adicional de interés para manejar cubiertas vegetales, decidir fechas de siembra, anticipar brotaciones, etc.

La medida adicional de la salinidad nos ayuda en la determinación de necesidades de lavado de sales y en el control de la fertilización.

El empleo de sensores de monitorización del contenido de humedad del suelo para programación de riegos debe complementarse con información de la Evapotranspiración de Referencia ETo y del cultivo ETc y, si es posible, con medidas y observaciones en la planta.



Figura 15. Sonda de humedad de suelo dotada sistema de adquisición y comunicación.

6.2.1. Tipos.

En función de cómo miden la humedad del suelo, los podemos diferenciar en dos tipos:

- Sensores individuales que miden el **potencial mátrico del agua en el suelo**, es decir el estado energético del agua en el suelo no saturado (tensiómetros, bloques de yeso, sensores digitales modernos, etc.). Con excepciones, miden la tensión del agua en el suelo en rangos de humedad limitados. Las alternativas digitales más modernas pierden fiabilidad en los extremos de humedad del suelo (seco y húmedo).
- Sensores individuales o sondas multisensores de monitorización del contenido de **humedad volumétrica del suelo** (o de la humedad volumétrica, temperatura y salinidad del suelo). Si exceptuamos a la sonda de neutrones, cada vez menos utilizada por su radioactividad, los sensores y las sondas modernos están basados en técnicas tipo TDR, TDT, FDR, etc., todas no radioactivas. La técnica FDR (Reflectometría de Dominio de Frecuencias) se conoce también como capacitancia y está basada en la medida de la constante dieléctrica del medio (agua 80, suelo 1, aire 0) y se debe de aplicar una ecuación de calibración.

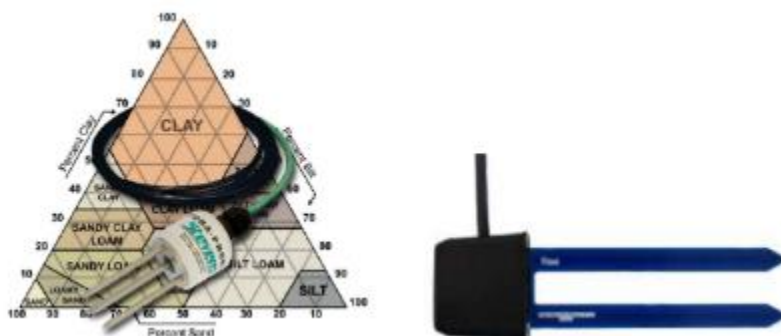


Figura 16. Ejemplos de sensores individuales de medida de la humedad volumétrica del suelo.

Sondas Encapsuladas



Sonda en tubo de acceso



Figura 17. Ejemplos de sondas multisensores de medida de la humedad volumétrica del suelo.

Los sensores y las sondas multisensores pueden ser portátiles o fijos conectados a registradores de datos con acceso local (PC o Teléfono Móvil) o remoto (radio, módem GPRS, Satélite, SigFox, LoraWan, etc.).

Las técnicas de medida no son recientes. Lo que va evolucionando, es el modo de acceder a los datos desde las lecturas manuales locales iniciales hasta el acceso remoto actual mediante las distintas técnicas de comunicaciones que van desarrollándose.

La instalación de todos los sensores modernos de monitorización de la humedad del suelo es crítica porque miden muy cerca del sensor. Es necesario asegurar el contacto íntimo del sensor con el suelo cuya humedad queremos medir e instalar alterando mínimamente el perfil del suelo. Un sensor mal instalado no sirve para nada con independencia de su coste.

Los sensores individuales requieren la apertura de hoyos o zanjas para su instalación, modificando el perfil de suelo que queremos monitorizar (cambios de densidad aparente, a veces con asentamientos posteriores al relleno de suelo extraído para instalar, alteraciones del movimiento del agua en el suelo, afectación del sistema radicular, etc. En general requieren tiempo de asentamiento y equilibrio con el suelo antes de que los datos generados sean de utilidad.

Para algunas sondas multisensores se han desarrollado herramientas y técnicas de instalación que tratan de minimizar la afectación del perfil de suelo a monitorizar. Lamentablemente, hay instaladores que ignoran estas técnicas y herramientas utilizando en su lugar perforaciones de mayor diámetro del requerido, rellenando el exceso con una mezcla de suelo y agua (barrillo). El contacto sonda suelo suele ser con frecuencia inadecuado y origen de infiltración preferente. Este tipo de instalación con barrillo debe limitarse a suelos muy pedregosos que no permiten una instalación correcta sin un barrillo que asegure el contacto adecuado entre sonda y suelo a monitorizar.

6.2.2. Unidades de medida de la humedad en suelo

En sensores de potencial mátrico, la unidad de medida es el MegaPascal pero a efectos prácticos se utilizan bares/centibares (tensiómetros, etc.).

En sensores de medida de la humedad volumétrica la unidad es el mm/mm o %:

- Por ejemplo, se requiere 1 litro de agua para cubrir un metro cuadrado (m^2) de suelo con una altura de agua de 1 milímetro. Esta relación nos permite expresar la humedad volumétrica del suelo como % o como altura de agua en mm.
- Si un sensor que explora una capa de 10 cm de suelo mide 10 milímetros de humedad, significa que hay 10 milímetros de contenido de agua en altura en una capa de suelo de 100 mm de altura. Para dicha capa de suelo (y sólo para ella), este contenido equivale a un contenido volumétrico del agua en el suelo del 10 % o 10 litros de agua en 100 mm de perfil del suelo. Un contenido de humedad volumétrica media del 30 % en un metro de perfil de suelo equivale a una altura de agua de 300 mm y a 300 litros de agua almacenados en un metro cúbico de suelo (no toda disponible para las plantas).

6.2.3. Sensor a utilizar (selección).

No hay un sensor en el mercado que sea mejor que todos los demás en cualquier circunstancia o aplicación, hay multitud de sensores de humedad en el mercado con precios muy variados. El coste puede ser una consideración a tener en cuenta, pero es más importante analizar la rentabilidad de la inversión y el trinomio sensor-datos-software de visualización y análisis de datos para identificar la alternativa más adecuada.

Debemos seleccionar equipos que nos proporcionen datos:

- Fiables.
- Contrastados.
- Fáciles de interpretar y gestionar.
- Rentables.
- Generados por equipos que no interfieran en el desarrollo normal de las operaciones de la explotación

Y que:

- Estén basados en técnicas fiables y contrastadas científicamente.
- Sean adecuados a la aplicación de interés.
- Dispongan de un soporte comercial y técnico adecuado.
- Se instalen utilizando las herramientas y técnicas adecuadas.
- Estén asociados a un buen software de visualización y gestión de datos.

La instalación correcta es crítica, por lo que las técnicas y equipos de instalación a emplear pueden servirnos para descartar sensores/sondas entre la amplia oferta disponible en el mercado.

Puede ser conveniente asesorarse con un experto agrónomo fiable, o con un servicio oficial de asesoramiento al regante con experiencia en la utilización de este tipo de equipos, para identificar la solución más adecuada a nuestras necesidades. Y siempre, es necesario analizar los datos con sentido crítico en base a nuestra experiencia y conocimiento agrónomo y con información de los condicionantes de la explotación

(calidad, cantidad y disponibilidad de la dotación de riego; sistema de riego; eficiencia de riego; cultivo; personal; etc.).

6.2.4. Uso de los datos generados por los sensores de humedad de suelo.

Los datos generados por los sensores y sondas de humedad del suelo requieren de un software de visualización y tratamiento de datos adecuado. Al mismo tiempo, es necesario también disponer de información actualizada de la explotación.

6.2.5. Sensores de humedad en el proyecto GoCitrics.

Se han utilizado sondas multisensores EnviroSCAN de Sentek Pty Ltd con transmisión de datos automática, con intervalo programado, vía módem GPRS (Figura 18) al servidor IrriMAX Live. Los datos y gráficos son accesibles en PC o dispositivo móvil. Son sondas tipo mecano que permiten ensamblar sensores en un soporte con conectores cada 10 cm. Se instalan dentro de un tubo de acceso insertado en el suelo, lo que permite acceder a ellas para operaciones de mantenimiento y re-colocación de sensores si fuera necesario. Permiten posicionar los sensores en profundidades adaptadas al sistema radicular del cultivo monitorizado como muestra el gráfico siguiente.

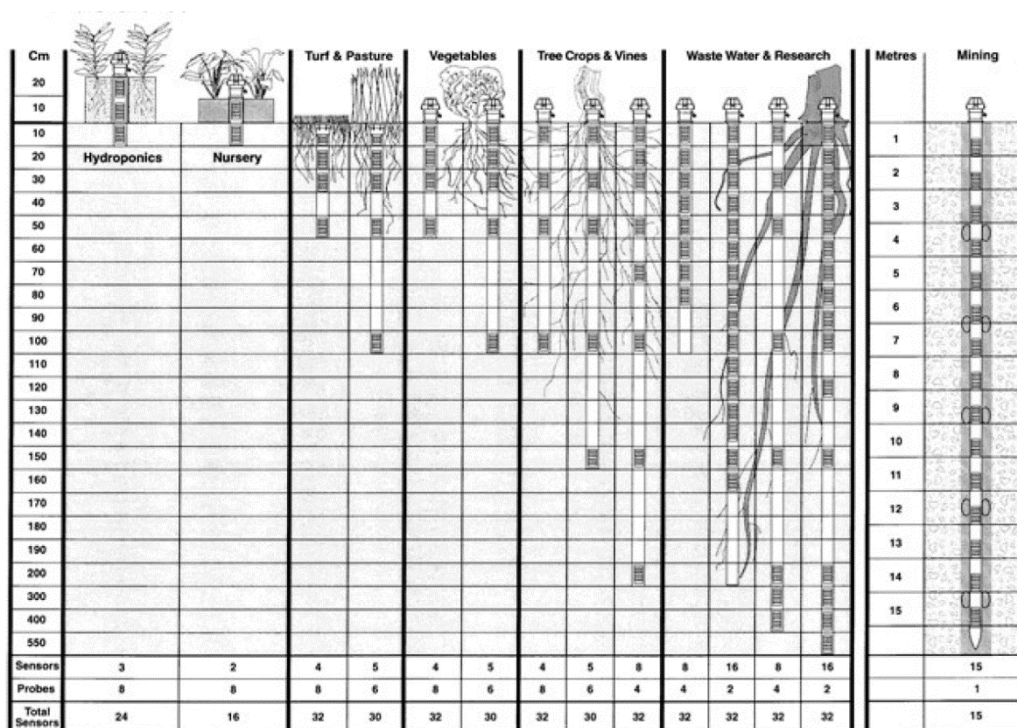
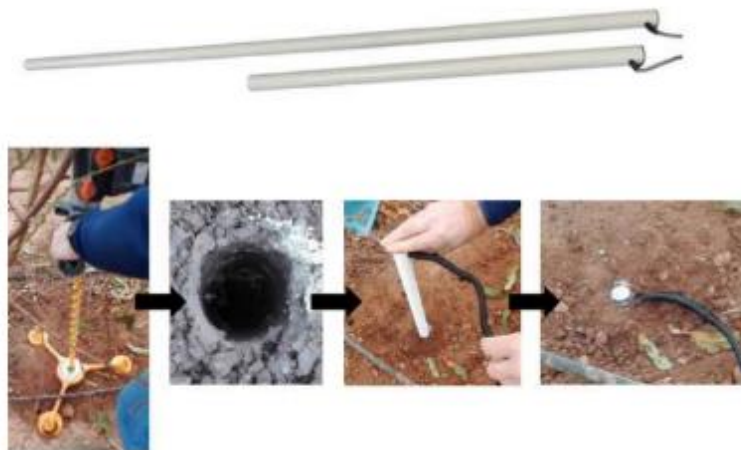


Figura 18. Adaptación de sondas multisensores EnviroSCAN de Sentek Pty Ltd.

6.2.6. Instalación.

Las sondas multisensores se instalan utilizando barrenas y taladros que causen la mínima alteración del perfil del suelo que se quiere medir, de forma que se consiga un íntimo contacto de la sonda con el suelo sin provocar caminos de infiltración preferente del agua en el suelo.

Por ejemplo, en el caso de sondas multisensores encapsuladas de la figura siguiente que tienen forma troncocónica, se utiliza un taladro portátil con una barrena de forma troncocónica lo que permite que la sonda se asiente adecuadamente en el perfil, en contacto íntimo con el suelo que queremos monitorizar, sin crear caminos de infiltración preferente.



https://www.youtube.com/watch?v=BAqgKxR0_Q

Figura 19. Detalles de instalación de sondas multisensores encapsuladas.

Y en el caso de las sondas EnviroSCAN utilizadas en el proyecto GoCitrics:



<https://www.youtube.com/watch?v=aCWPDVum7Hc>

<https://www.youtube.com/watch?v=IEzmqw4n8dvl>

Figura 20. Detalles de instalación de sondas EnviroSCAN. La segunda imagen muestra la posibilidad de adaptar en estas sondas las posiciones de los sensores a variaciones de textura en el perfil del suelo.

Los sensores y sondas se instalan en puntos representativos de lo que queremos medir (en base a mapas de suelos (textura, profundidad y problemas: pedregosidad, pendiente, drenaje, etc.), cultivos, variedades y sectores de riego).

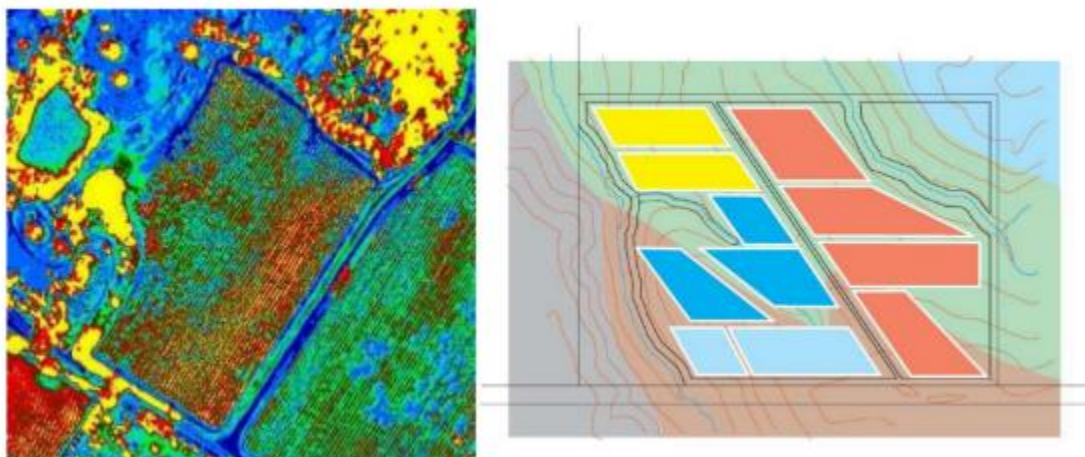


Figura 21. Ejemplos de variabilidad en mapas de suelos.

En el caso de riego por goteo se suelen instalar a unos 10/15 cm del gotero (en función de la textura del suelo) en un lugar representativo con presencia de raíces activas, por lo que debe haber humedad (sin exceso).



Figura 22. Ubicación de sondas. La foto inferior derecha muestra un punto de instalación excesivamente húmedo (mancha evidente en superficie por duración de riego y caudal de gotero excesivo para la textura del suelo del lugar).

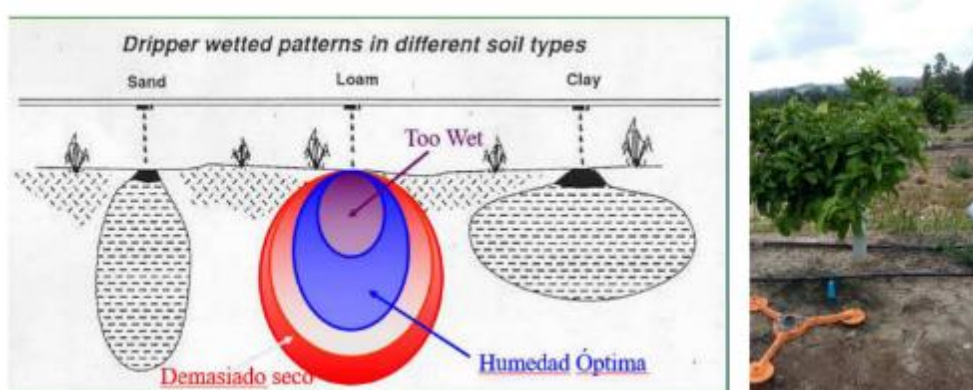


Figura 23. Distribución de humedad en bulbo húmedo (izda.). Soporte de barrena (dcha.).

Lo ideal es disponer inicialmente de dos sondas, una cercana al gotero y otra en el borde del bulbo húmedo o entre dos goteros. La segunda sonda nos dará información de si crece o decrece el bulbo. Las sondas se

pueden recolocar una vez se aprenda de la situación particular. Herramientas auxiliares muy útiles, pero, lamentablemente poco utilizadas, son la barrena manual, la pala recta y la azada que nos permiten explorar en profundidad en puntos de interés el estado de humedad del suelo y la disposición del sistema radicular.

6.2.7. Manejo de las sondas de humedad de suelo.

Determinación de cuándo, cuánto y cómo regar: Las sondas facilitan información en continuo de la evolución del contenido de humedad del suelo en el perfil explorado por las raíces que sirve de apoyo a la toma de decisiones de gestión agronómica que tienen aparejado un riesgo empresarial.

Nos ayudan a implementar, hacer el seguimiento y afinar estrategias de riego y fertilización del cultivo.

El gráfico siguiente nos muestra la evolución de la humedad del suelo monitorizado con una sonda EnviroSCAN con sensores a 10, 20, 30, 40 y 50 cm de profundidad. Es un gráfico suma de los valores de todos los sensores y representa la humedad en mm a lo largo del tiempo. En él se produce un riego seguido de un drenaje rápido y una disminución con drenaje y extracción durante el día y sólo drenaje sin extracción por la planta durante la noche. Este gráfico en escalera nos indica la presencia de raíces activas (extracción diurna). La zona azul representa un perfil lleno (si se aplica más agua drenará por debajo de donde hay raíces activas), la zona verde indica niveles de humedad adecuados para el cultivo y la zona roja niveles de humedad que resultan en estrés hídrico en el cultivo por falta de agua (disminuye la tasa de extracción) y, por tanto, se debería regar antes de llegar a este nivel de agua en el suelo.

En resumen, mediante la monitorización en continuo del contenido volumétrico de agua en el suelo se determina la presencia o ausencia de raíces activas, es decir se monitoriza indirectamente la actividad de la planta y cómo se ve afectada por el nivel de agua en el suelo.

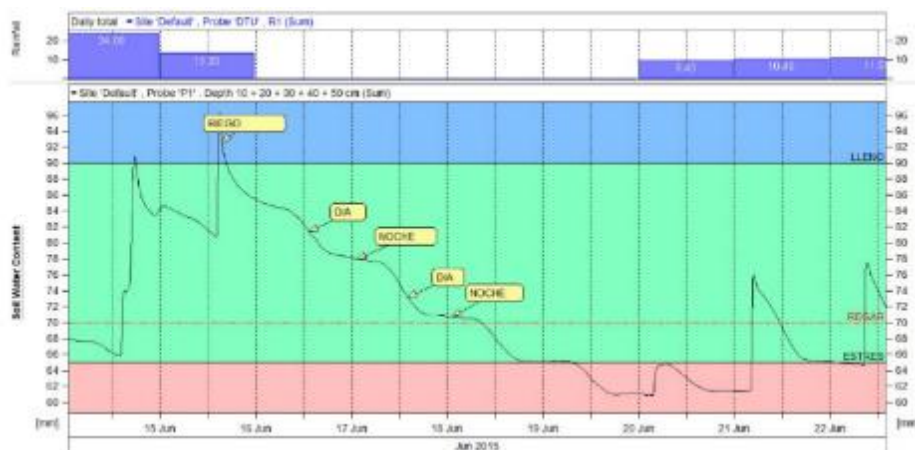


Figura 24. Monitorio de la actividad de la planta tras un riego con identificación de alternancia día/noche.

Con dicho monitorio, se puede determinar la extracción, la hora de comienzo y fin de la extracción de agua por el cultivo y, contrastarlo, con las horas de riego y su duración.



Figura 25. Descenso de humedad de suelo equivalente a demanda evaporativa.

Si el nivel de humedad es adecuado, la extracción de agua por el cultivo está relacionada con el nivel de demanda evaporativa del medio (Evapotranspiración de Referencia o ETo).

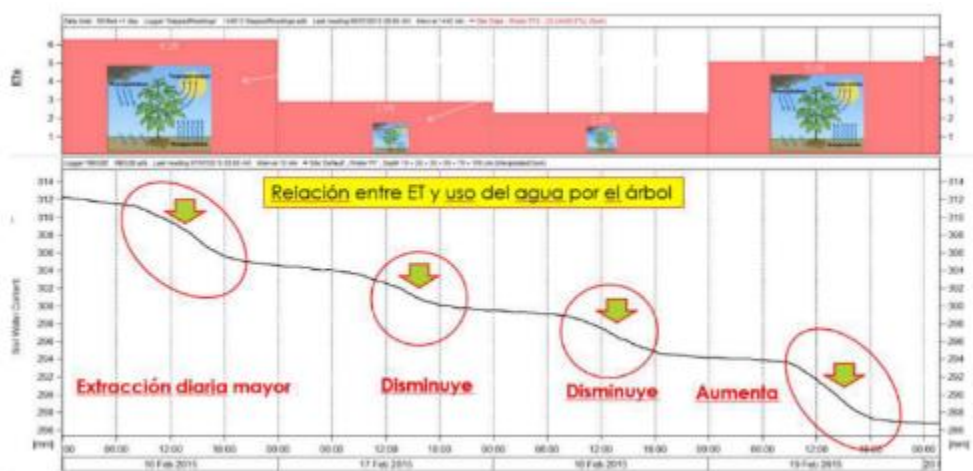


Figura 26. Relación de la extracción de agua con la demanda evaporativa.

Si el nivel de agua en el suelo es insuficiente en relación a la demanda evaporativa se observa una disminución de la extracción de agua por el cultivo (estrés hídrico).

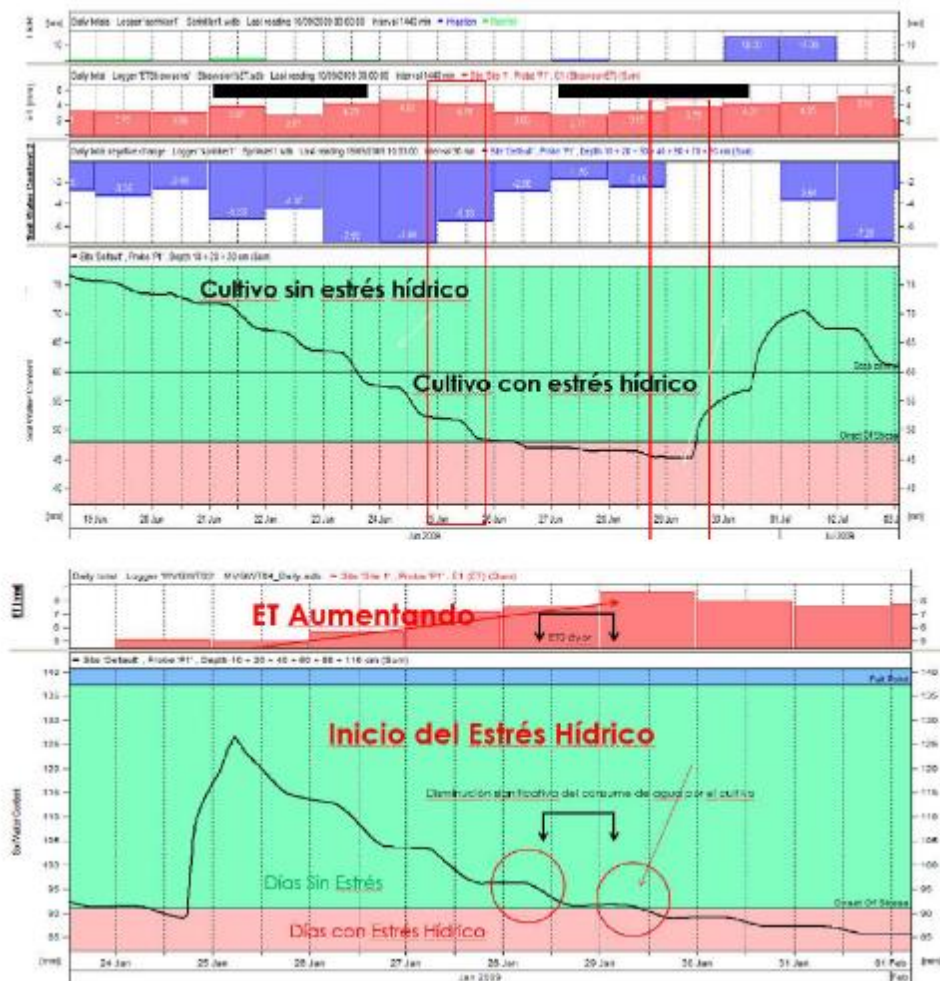


Figura 27. Disminución de extracción en situaciones de estrés

El estrés hídrico puede ser debido a exceso de agua (saturación) que provoca anoxia radicular (falta de oxígeno). La planta reanuda su actividad cuando drena el suelo y se repone el oxígeno.

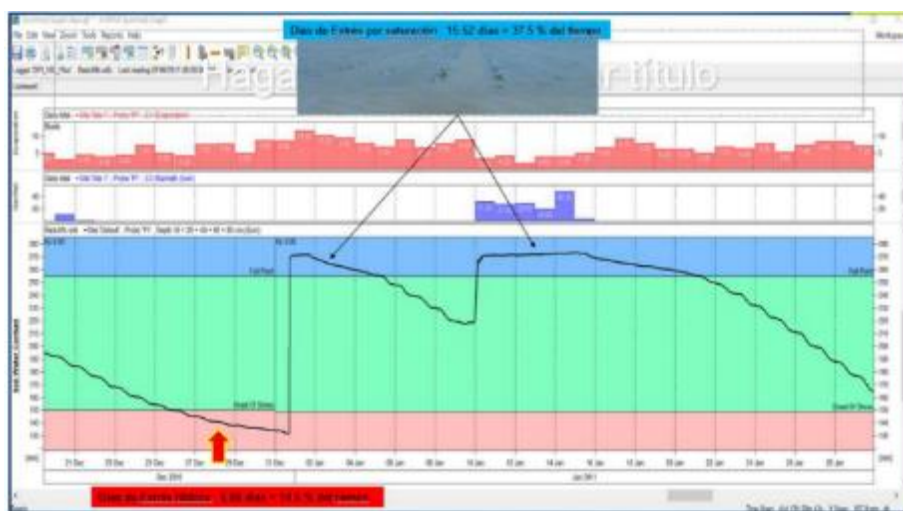


Figura 28. Situación de estrés hídrico por exceso de agua en el suelo (saturación).

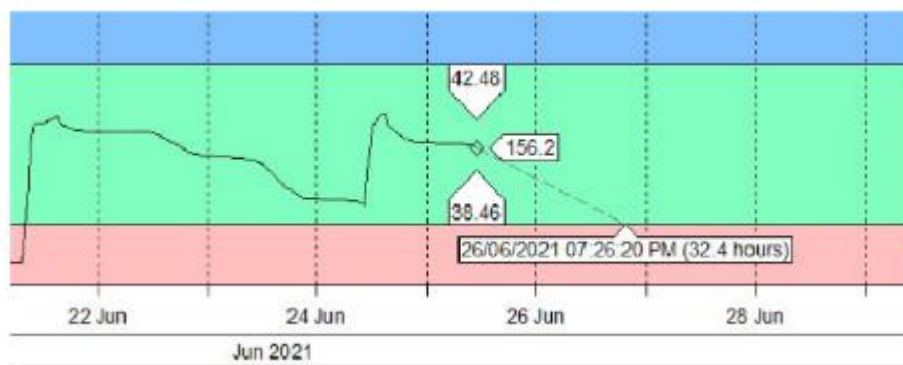


Figura 31. Detalle de estimación del instante y volumen del próximo riego.

Alternativamente, se pueden determinar los niveles de gestión en riego por goteo, estimando el nivel lleno después del drenaje rápido posterior a una lluvia o riego que llene el perfil de suelo y un nivel de gestión del riego basado en un porcentaje de extracción de dicho nivel, 10 % por ejemplo; basándose en la reposición diaria de las extracciones del cultivo y en la consideración del riego por goteo como “hidroponía al aire libre”, aplicando el fertilizante mediante el sistema de riego. Sin embargo, se estaría ignorando la capacidad de almacenaje de agua y nutrientes del suelo y en sistemas agronómicos con suelos pesados y lluvias intensas que saturan el suelo, regar para abonar puede dar lugar al mantenimiento del suelo saturado desplazando el oxígeno y provocando anoxia radicular.

El gráfico siguiente muestra una determinación de niveles de gestión con nivel de estrés basado en un porcentaje del perfil lleno. El riego no se ha controlado adecuadamente y se ha provocado un estrés por falta de agua.

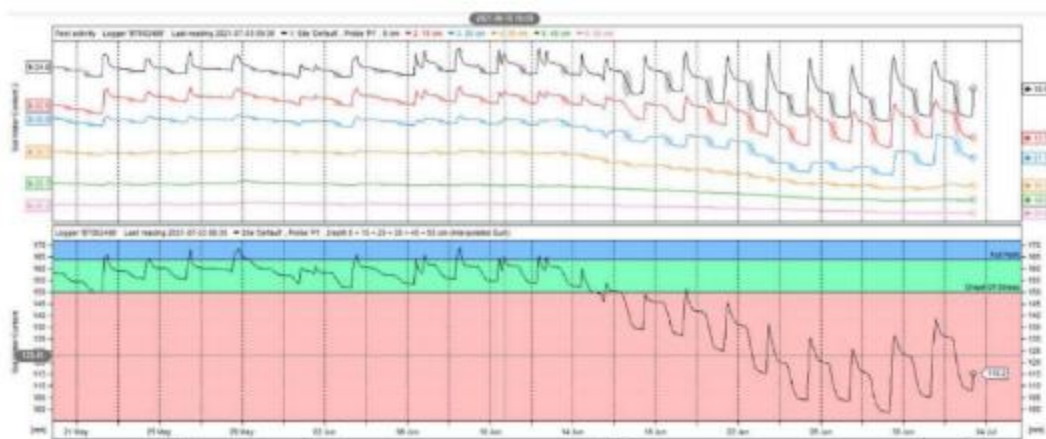


Figura 32. Ejemplo de diseño incorrecto de intervalos de riego.

El gráfico aumentado de los sensores individuales apilados muestra la actividad del sistema radicular por profundidades.

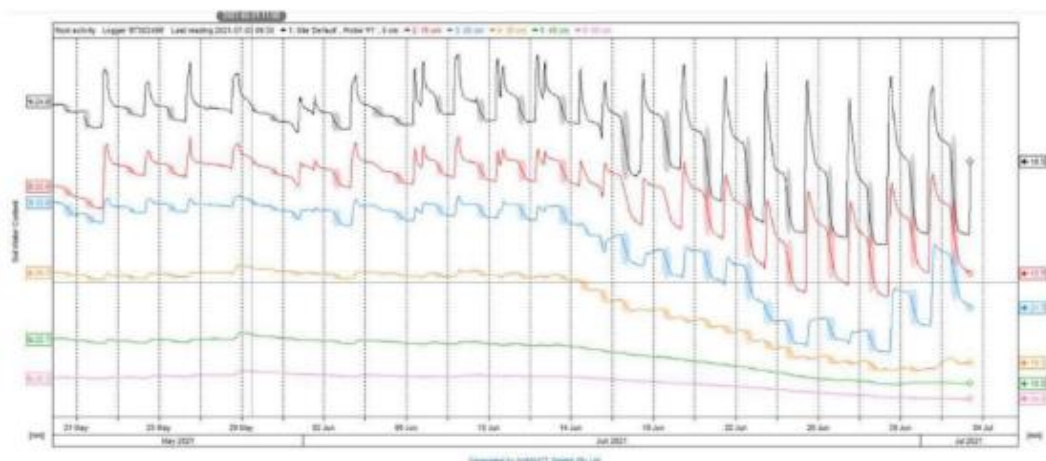


Figura 33. Detalle (figura anterior) del registro de sensores.

Si se modifican las líneas de gestión en base a estrés y nivel de riego, se obtiene el siguiente gráfico.

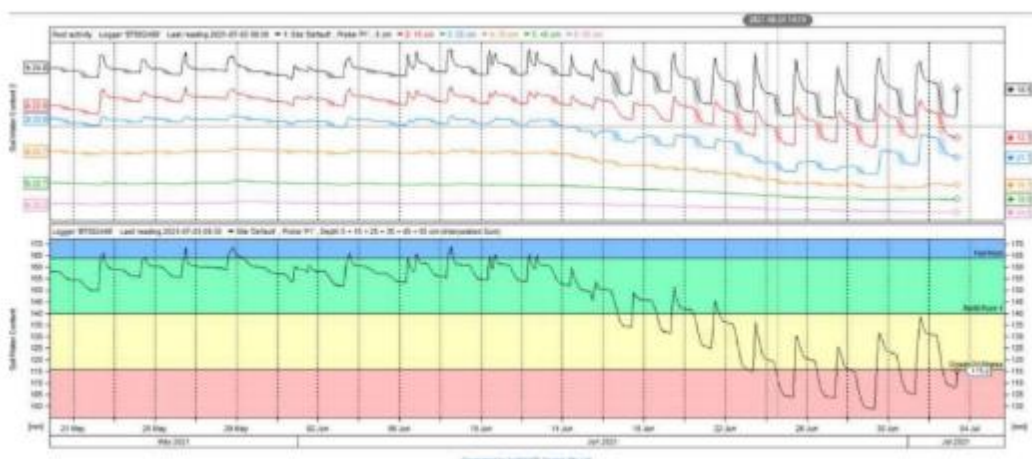


Figura 34. Corrección sobre estrés y nivel de riego de situación de partida.

Se ha provocado un estrés, no se ha ajustado adecuadamente el cuándo, cuánto y cómo regar.

Si analizamos los riegos en detalle podemos determinar además cómo regar.

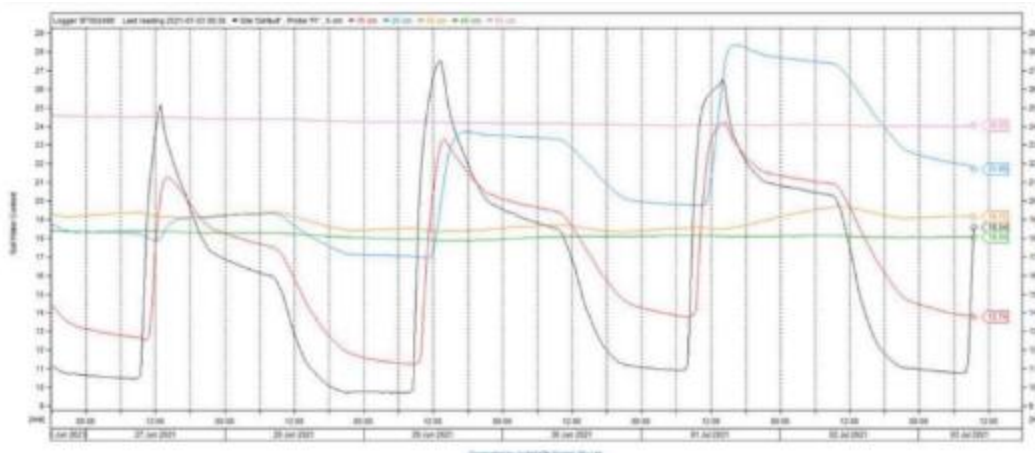


Figura 35. Sensores individualizados con valores reales.

En el gráfico de sensores individualizados ordenados por profundidades (no por contenido de humedad) se representan con colores la extracción, la altura indica el nivel de extracción y la anchura la duración.

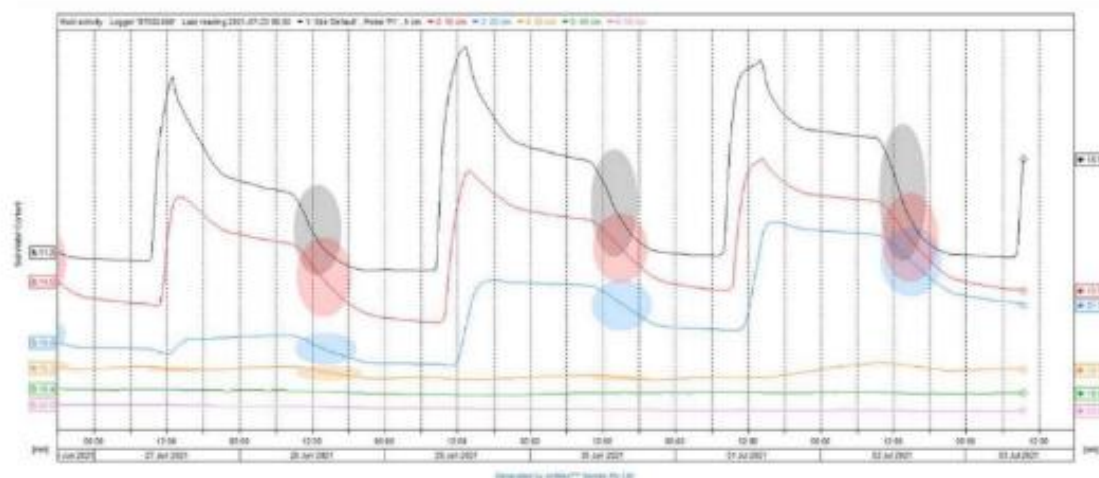


Figura 36. Sensores individualizados con valores reales ordenados por profundidades.

La situación mostrada en la Figura 36 se corresponde con un suelo franco arenoso con riego en días alternos. Se observa una duración excesiva del riego con extracción al día siguiente del mismo. El tercer sensor más profundo muestra acumulación temporal de agua por drenaje de los dos superiores. Si los condicionantes de la explotación lo permiten, la recomendación es aumentar la frecuencia y disminuir la duración de los riegos manteniendo el nivel de agua en el suelo en zona de confort del cultivo.

Estrategias de riego: La definición de las estrategias de riego es responsabilidad del agricultor/agrónomo en base a objetivos de producción y circunstancias de la explotación (cultivo, suelo, suministro de agua, condicionantes de la explotación, etc.). La monitorización en continuo del agua en el suelo mediante sondas multisensores de humedad nos ayuda a definir, implementar, hacer el seguimiento y afinar estrategias de riego, pero no es nunca sustitutiva del juicio y análisis agronómico que debe tener además en consideración otros factores además de los niveles de agua en suelo.

En la siguiente gráfica se puede observar un ejemplo de estrategia de riego en viña (Cabernet Sauvignon) por fases de cultivo. Los riegos se ajustan para producir el tipo de uva que demanda la bodega para producir un tipo de vino determinado.

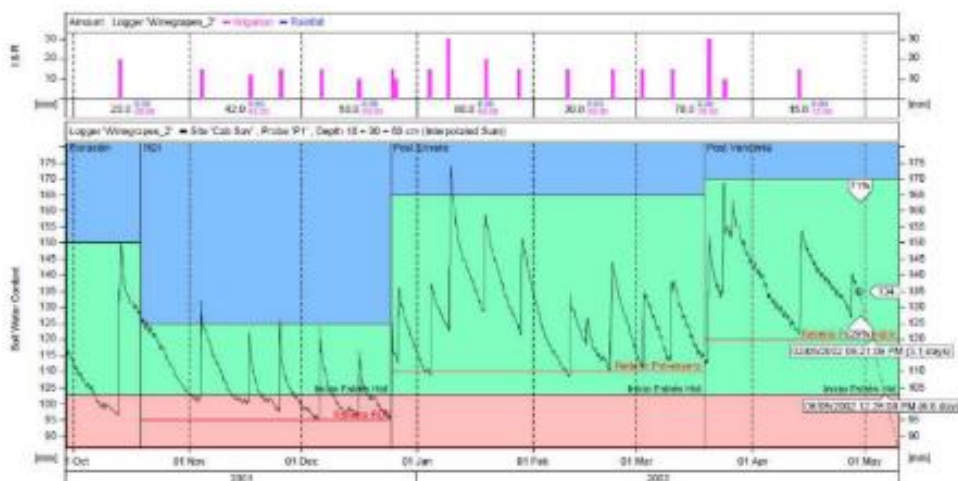


Figura 37. Estrategia de riego en viña.

En la siguiente figura se ilustra una estrategia de riego en nectarina temprana. Se induce estrés controlado después de cosecha para reducir crecimiento vegetativo y ahorrar poda de verano.

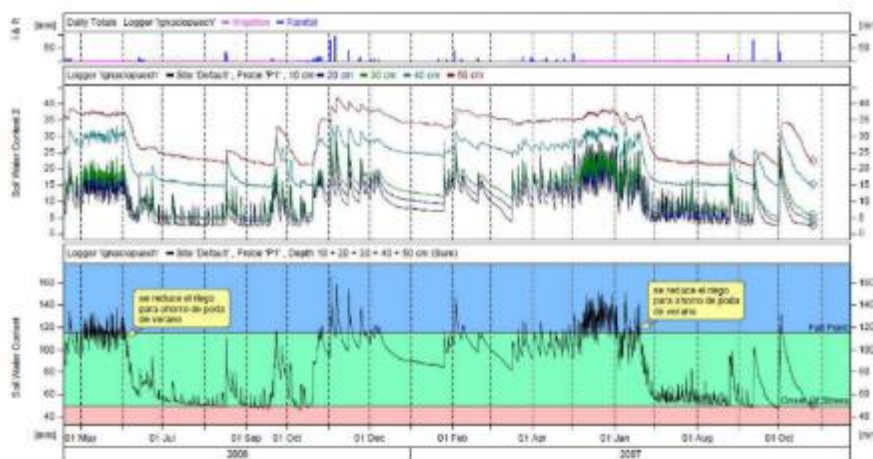


Figura 38. Estrategia de riego en nectarina temprana.

Medida de la salinidad: Existen en el mercado sensores y sondas mutisensores que, además de la humedad del suelo, pueden medir la temperatura y la salinidad del medio. No se han utilizado en este proyecto, pero son de interés para monitorizar la salinidad del medio intrínseca del mismo o de vida a aportes de sales por lluvia, riego o la aplicación de fertilizantes (de interés por tanto para la gestión de la fertilización).

El estándar de medida de salinidad es la medición en pasta saturada, es una medida que requiere de experiencia y pocos laboratorios la realizan.

Los sensores de salinidad disponibles pueden medir la conductividad del medio (conjunto de la matriz del suelo, aire y solución del mismo) o el contenido volumétrico iónico (VIC) de la solución del suelo. En cualquier caso, las comparaciones de las medidas de conductividad deben hacerse con valores obtenidos con el mismo contenido de humedad.

La naturaleza física y química del suelo es compleja y si se requieren medidas en unidades de Ece hay que calibrar los valores de VIC. Para sondas Drill & Drop TriSCAN que miden humedad, salinidad de la solución del suelo (VIC) y temperatura del suelo se pueden derivar ecuaciones de calibración de VIC y Ece.

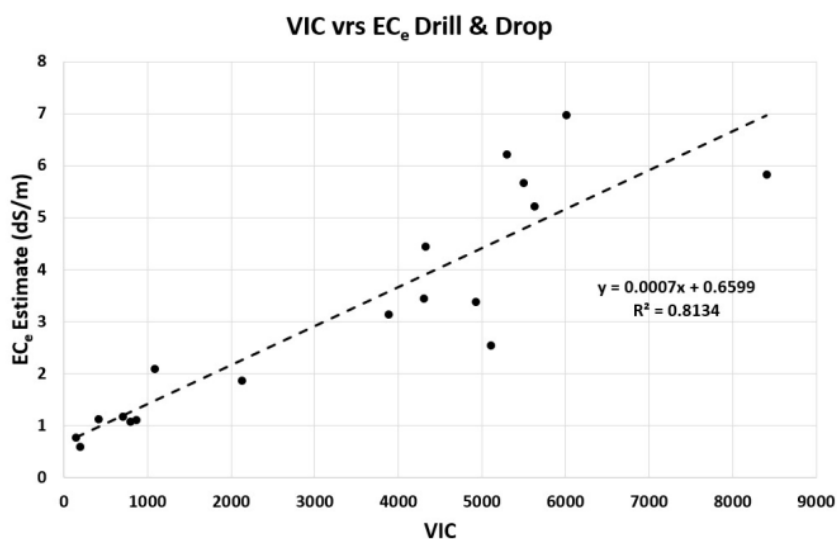


Figura 39. Gráfico de calibración de la conductividad eléctrica y el contenido volumétrico iónico (VIC).

En el ejemplo siguiente se representan datos de una sonda Drill & Drop TriSCAN de 60 cm. En la ventana inferior se representan los valores de VIC de los sensores ordenados por profundidades, en la ventana media los valores de VIC transformados a Ece y en la superior los valores de humedad de suelo. Es un suelo franco arenoso, los riegos son de duración excesiva y los datos muestran saturación a todas las profundidades. Los incrementos de VIC y Ece muestran lavado de fertilizantes. Los datos son de interés para mejorar la gestión del riego y la fertilización.

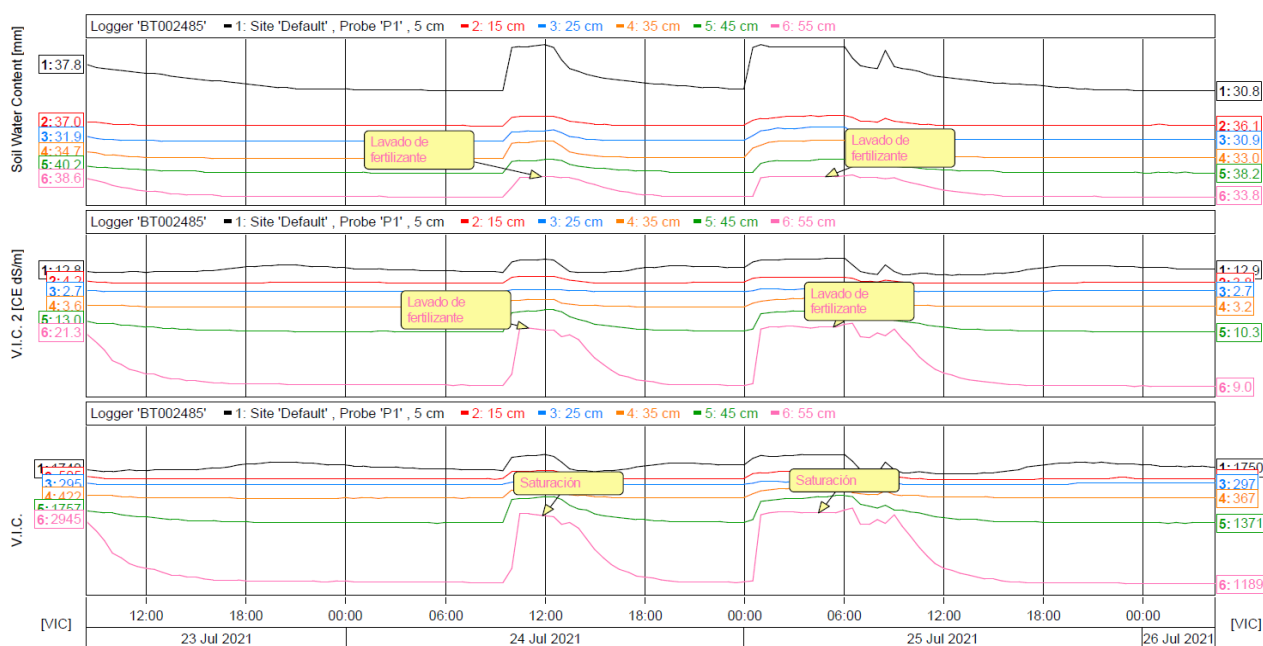


Figura 40. Ejemplo de evolución de VIC y Ece registrada mediante una sonda Drill & Drop TriSCAN.

6.3. Cámara de presión.

La mejor forma de saber si las pautas de riego son las adecuadas es conociendo el grado de hidratación de la planta mediante el análisis de su estado hídrico. Este control es fundamental para poder ajustar con mayor precisión la dosis de riego, así como para predecir los posibles efectos de un riego sobre el comportamiento productivo del cultivo. En la actualidad, el sistema de medición más empleado es la cámara de presión o cámara de Schölander, que permite medir el potencial hídrico de la planta [37] . La cámara de presión está compuesta por una (1) cámara metálica de cierre hermético, (2) un manómetro de presión, (3) una válvula de 3 vías para regular la entrada de gas en la cámara y (4) una válvula de regulación del caudal del aire (Figura 41). El método de medida consiste en introducir una hoja en la cámara hermética, dejando sobresalir el pecíolo por un orificio y se encierra herméticamente. A continuación, utilizando la válvula de 3 vías, se aplica gas (aire o nitrógeno, normalmente) en el interior de la cámara. Con la válvula de regulación (4) se controla el caudal de gas que entra lentamente en la cámara, no superando un aumento de presión 0,5 bares por segundo. Se mantiene la subida de presión en la cámara hasta que por el pecíolo de la hoja aparece la primera gota de savia (Figura 41), y en ese mismo momento se cierra la válvula de 3 vías (3) y se toma la lectura que proporciona el manómetro (2). Cuanta mayor presión necesitamos para hacer aparecer la gota de savia, mayor fuerza está ejerciendo la hoja sobre él, luego contiene menos agua y en definitiva indica que está más estresada.

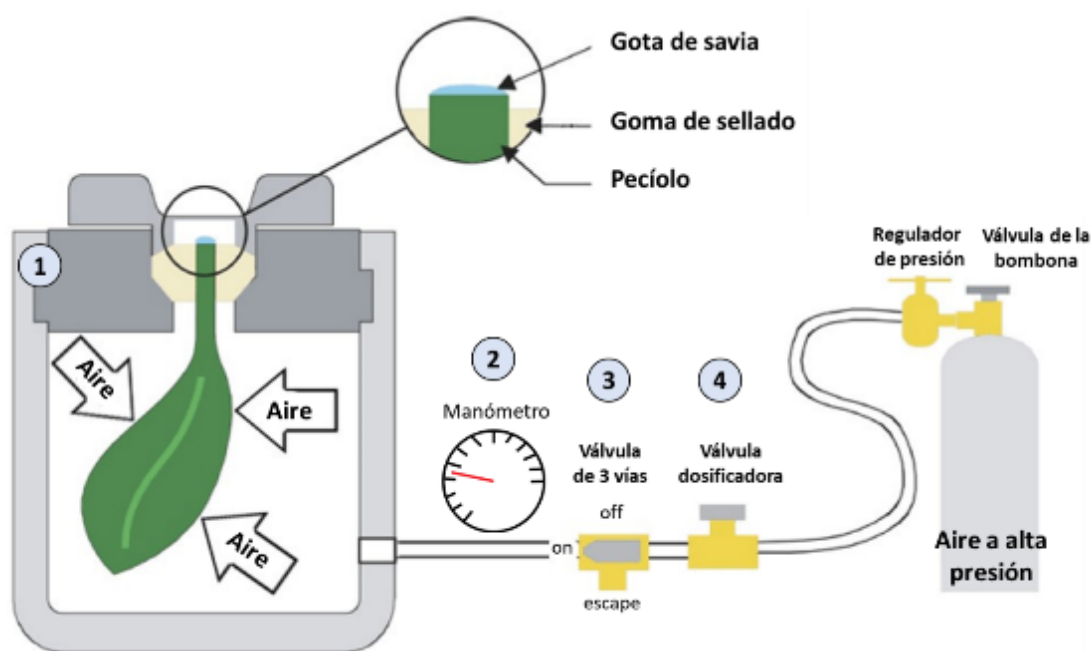


Figura 41. Representación esquemática de la cámara de presión.

Existen dos métodos de medida utilizando la cámara de presión, dependiendo de si la hoja está expuesta a las condiciones ambientales (potencial hídrico de hoja, Ψ_{hoja}) o no (potencial hídrico de tallo, Ψ_{tallo}). El método más utilizado es el Ψ_{tallo} medido al mediodía, al ser una medida más estable y global del estado hídrico de la planta. El Ψ_{tallo} indica la capacidad de la planta para conducir el agua desde el suelo hasta las hojas. Para realizar esta determinación, se deben seleccionar de 5 – 6 hojas maduras de la parte interior del árbol de cada unidad homogénea suelo – planta en la que se está realizando la programación del riego. Estas hojas deberán ser cubiertas con bolsas de plástico aluminizadas durante al menos 1 hora. Tras pasado ese tiempo, se cortan las

hojas de una en una (muy importante) por la base del pecíolo con una cuchilla y se coloca la hoja en el interior de la cámara de cierre estanco, dejando el extremo del pecíolo en el exterior de la cámara (figura 42 A). Hay que procurar que no transcurran más de 30 segundos desde que se corta hasta que se introduce en la cámara. Una vez la cámara está cerrada, se debe aplicar lentamente aire a presión al interior (figura 42 B) hasta la aparición de una pequeña mancha de humedad en el corte del pecíolo (xilema) (figura 42 C). En ese momento, se cierra la válvula y se toma nota de la lectura del manómetro.



Figura 42. A) Inserción de la hoja en la cámara. B) Medida de potencial. C) Humectación del corte.

Los valores del potencial se obtienen en bares (-bar) o megapascuales (-MPa) y siempre son valores negativos, puesto que estamos midiendo la tensión a la que está retenida el agua en el interior del tejido (1 bar = 0.1 MPa). Cuanto mayor sea el déficit hídrico, mayor será la presión aplicada.

6.3.1. Interpretación de datos.

Existe abundante bibliografía que establecen valores de referencia de los valores de potencial hídrico de tallo (Ψ_{tallo}) para los diferentes estados fenológicos del cultivo. Por su desarrollo en las principales zonas citricolas de España, se pueden tomar como referencia para árboles en plena producción los estudios realizados por [38] Ballester y col. (2013) (naranja-1), [39] Martínez-Gimeno y col. (2018) (mandarino-2), [40] Robles y col. (2016) (limonero Fino-3), [41] Pérez-Pérez y col (2014) (pomelo-4) (tabla 6). No obstante, hay que tener en cuenta que dichos valores se deben tomar como referencia, ya que pueden variar por diversos factores como el portainjerto utilizado, el diseño de la instalación de riego, la carga de frutos, etc. En el caso de arbolado en desarrollo, los valores de referencia se establecerán, entre -0,6 y -0,8 MPa para el periodo de octubre a mayo y entre -0,8 y -1,0 MPa en los meses de verano.

Tabla 6. Valores de referencia de potencial hídrico de tallo (Ψ_{tallo} , MPa) para árboles de cítricos bien regados.

Periodo fenológico	Naranja ⁽¹⁾	Mandarino ⁽²⁾	Limonero Fino ⁽²⁾	Pomelo rojo ⁽⁴⁾
<i>Brotación-cuajado</i>	> -0,8	> -0,8	> -0,8	> -0,8
<i>Fase I</i>	-0,8 / -1,0	-0,8 / -1,0	-0,8 / -1,1	-0,8 / -1,0
<i>Fase II</i>	-1,0 / -1,2	-1,0 / -1,2	-1,1 / -1,3	-1,0 / -1,2
<i>Fase III</i>	-0,8 / -1,0	-0,8 / -1,0	-0,8 / -1,1	-0,8 / -1,0
<i>Reposo</i>	> -0,8	> -0,8	> -0,8	> -0,8

6.3.2. Equipos en el mercado.

En el mercado existen distintos tipos de cámaras. Por un lado, encontramos las cámaras manuales tipo “Pump-up” (Figura 43, izquierda), que de forma manual mediante un movimiento repetitivo ascendente-descendente,

aplican aire a presión hasta obtener la presión requerida que desplace la savia a través de la hoja. Este equipo permite aplicar una presión máxima de hasta 20 bar (2 MPa). El precio de este equipo ronda los 2300 €, siendo recomendable para la programación del riego en explotaciones pequeñas. Por otro lado, se encuentran las cámaras de presión que emplean bombonas de gas para suministrar el aire a presión (Figura 43, derecha). Este tipo de cámara de presión permiten alcanzar presiones de trabajo más elevadas (40 – 80 bares), siendo las adecuadas para el control del estado hídrico de la planta cuando se aplican riegos deficitarios. Son mucho más cómodas y rápidas, y permiten abarcar un mayor número de medidas en un menor tiempo. Existen diversos modelos en el mercado, y su precio ronda los 3000 €, a lo que habría que sumar unos 150 €/año en suministro de gas (dependiendo del número de medidas que se realicen). En cuanto al tipo de gas, es frecuente utilizar nitrógeno seco, por ser seguro y económico.

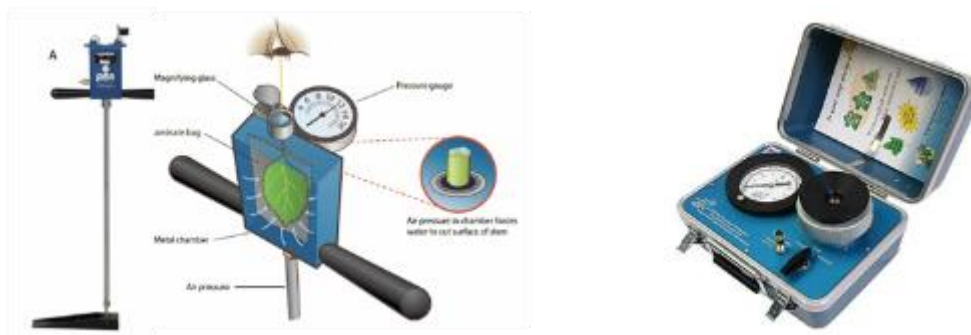


Figura 43. Cámara de presión manual (Izda.). Cámara de presión para botella de gas (dcha.).

6.4. Sondas de succión.

La determinación del contenido en agua y de la concentración de los iones en la solución del suelo es fundamental para conocer los nutrientes que se encuentran disponibles para las plantas. Esta información será esencial para el manejo de la fertilización de los cultivos. Para la obtención de muestras del agua intersticial del suelo se pueden utilizar, fundamentalmente, tres tipos de métodos de muestreo: (i) pasivos, por medio de lisímetros que recogen el agua que se mueve por gravedad); (ii) extractores porosos, mediante el establecimiento de depresiones en el interior del material poroso; y (iii) ensayos destructivos, que consisten en muestrear el suelo en el campo y la extracción del agua intersticial en laboratorio [42]. Las dos primeras técnicas de muestreo se consideran directas, mientras que el muestreo de suelo es un método indirecto.

En los lisímetros de gravedad, el drenaje ocurre sólo cuando la tensión del agua en la parte inferior del suelo del lisímetro es próxima a cero, lo que condiciona enormemente su capacidad de muestreo. Dado que estas no son las condiciones habituales de campo, se han desarrollado unos instrumentos para el muestreo de la solución intersticial del suelo basados en el establecimiento de una depresión o succión controlada en el interior de un material poroso, mediante una bomba manual o mecánica, consiguiéndose así el paso del agua desde el suelo al interior del toma muestras [43]). El valor de la depresión aplicada es variable en función de la textura del suelo, de la conductividad hidráulica y del contenido del agua, aunque suele estar comprendido entre -0,30 y -0,80 bar, lo que permite muestrear una esfera entre 30-50 cm alrededor de la cápsula porosa, durante varios días [43] .

Existen dos tipos de toma-muestras porosos: (i) los denominados lisímetros de vacío, que son los más utilizados actualmente, y (ii) los extractores “radiculares” tipo Rhizon. Los lisímetros de vacío están formados por un tubo que lleva sellado en uno de sus extremos una cápsula de porosa y el otro extremo del tubo se cierra con un tapón taladrado con uno o dos orificios por los que se insertan tubos para realizar el vacío y el muestreo del agua obtenida. Los extractores “radiculares” tipo Rhizon están formados por un tubo de un polímero orgánico hidrófilo y poroso, sellado en un extremo y abierto al exterior en el otro mediante un conector roscado. En el interior del tubo una guía de acero (fibra de carbono, titanio o nylon) confiere cierta rigidez al extractor permitiendo así su inserción en el suelo. La solución del suelo se extrae generalmente aplicando vacío sobre el extremo roscado bien con una jeringa o mediante una bomba de vacío manual o automático [44] . En el mercado están disponibles diferentes materiales aptos para la fabricación de las cápsulas porosas de estos lisímetros, entre los que se encuentran: cerámicas convencionales, cerámicas especiales (borosilicatos, carburo de silicio, etc.), teflón, nylon, poliacrilonitrilo, polisulfonas, polietileno, vidrio poroso, acero inoxidable etc.

Estas sondas de succión están formadas por (Figura 44):

1) Cápsula cerámica, 2) Tubo rígido de policloruro de vinilo (PVC) de diámetro nominal 50 mm, 2,4 mm de espesor de pared y 10 atm de presión nominal, 3) Tapón de PVC de 50 mm de diámetro interior, 4) Machón rosca macho-macho de 15 mm de diámetro nominal en acero galvanizado y 5) Válvula de esfera de 15 mm de diámetro nominal.

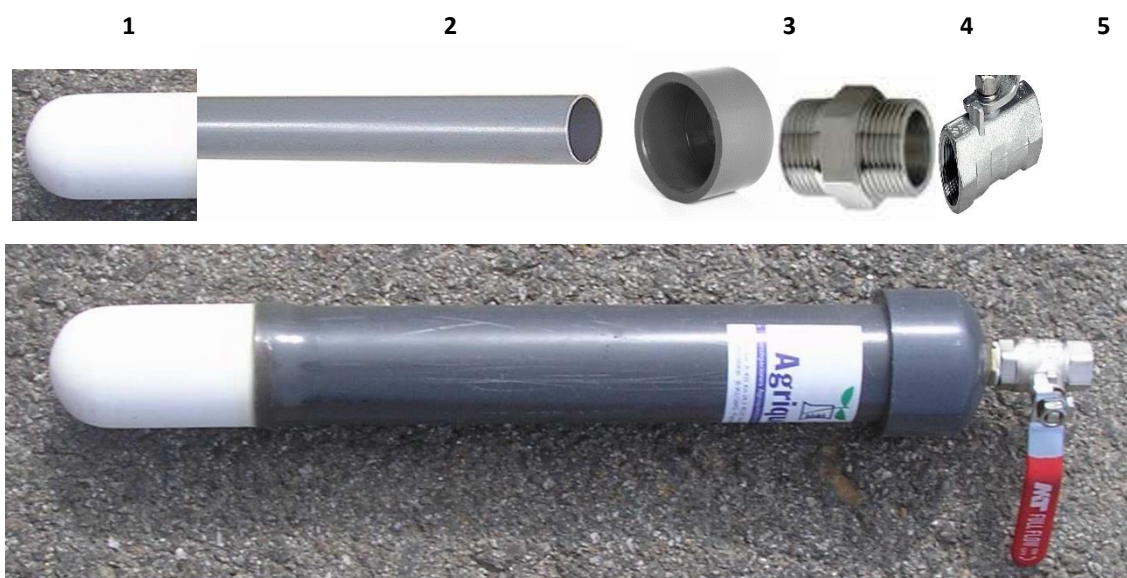


Figura 44. Despiece (1. cápsula cerámica, 2. tubo rígido de PVC, 3. tapón de PVC, 4. machón de acero y 5. válvula de esfera en acero) y prototipo de lisímetro de vacío fabricado. [42]

Las sondas se instalan en el terreno a diferentes profundidades mediante unas barrenas cilíndricas de acero inoxidable de 4 cm de diámetro. Las profundidades deseadas de colocación serían alrededor de 45 cm, donde las raíces absorbentes de los cítricos se encuentran mayoritariamente, y entre 60-70 cm, para evaluar los nutrientes que se lixivian por debajo del sistema radicular absorbente.



Figura 45. Detalle de la instalación de sondas de succión a 20, 40 y 60 cm de profundidad.

El procedimiento a seguir para el muestreo es el siguiente: horas antes de la extracción se aplica una depresión en el interior de la sonda (vacío en la sonda, de -0,6 bar), mediante una bomba de succión mecánica (Figura 46).



Figura 46 . Bomba de vacío KNF lab, Laboport y detalle de la extracción de la solución.

Antes de la extracción de la solución del suelo, se rompe el vacío y, de este modo se provoca la entrada de la solución del suelo en la cápsula. La extracción de la solución se realiza a partir de unos tubos de cobre, de longitud variable según a la profundidad a la que estén colocadas las sondas, conectados a unas jeringas de diferente volumen. Las soluciones de suelo, posteriormente, se recogen en recipientes y se transportan refrigeradas hasta su análisis.

Los factores más importantes que pueden afectar al funcionamiento de los lisímetros de vacío son [42]:

- La magnitud de vacío que se establece en el toma-muestras. Esto es un aspecto importante ya que puede afectar al volumen de muestra obtenida, debido a la fuerza de succión establecida, y a su composición, a causa del diferente grado de mineralización de la solución contenida en los poros según su diámetro. La presión de entrada de aire en la cápsula porosa está condicionada por el diámetro de poros, en las cápsulas utilizadas generalmente varía entre -1 y 2 bares, lo que permite

trabajar sin riesgos de entrada de aire en las depresiones de -0,3 a -0,8 bar, que son habituales en el terreno.

- La zona de influencia de la cápsula y la representatividad de las muestras extraídas. Los lisímetros de vacío modifican escasamente la distribución de flujos en el suelo, dado que el área de influencia de la cápsula porosa es reducida, normalmente de 30 a 50 cm alrededor de la misma, aunque ello esté estrechamente relacionado con el volumen interno del lisímetro. No obstante, la composición en sales de la solución extraída es similar a la obtenida por otros métodos en la zona circundante a la cápsula porosa.
- El tiempo de muestreo. El periodo durante el cual el toma-muestras permanece en estado de muestreo debe adaptarse a los objetivos del estudio.
- Perturbación del suelo. Las alteraciones de la estructura del suelo producidas durante la instalación pueden crear canales preferenciales de flujo, normalmente en dirección paralela a la toma-de muestras de la solución del suelo que pueden alterar la representatividad de la misma, aunque este efecto va disminuyendo conforme aumenta el tiempo desde la instalación.
- Modificación de la fase gaseosa en contacto con la muestra. El establecimiento de una presión negativa en el interior del toma-muestras produce una perturbación en la fase gaseosa del suelo que tiende a equilibrarse con la fase gaseosa atmosférica, lo que puede producir la precipitación o transformación de la composición del agua muestreada y un aumento del pH.
- Modificación de la composición química de la muestra. La composición química de la muestra respecto a la solución del suelo real se ve condicionada por el tipo de cápsula porosa utilizada, especialmente el material de fabricación. El material de la cápsula puede provocar cambios en la composición química durante el paso a través de la misma, dado que puede no ser totalmente inerte desde el punto de vista químico.

6.5. Teledetección.

La misión de las explotaciones agrícolas es generar alimentos que serán llevados al mercado para ser adquiridos por los consumidores. Esta producción implica un proceso que parte en el campo y está constituido por múltiples etapas interrelacionadas entre sí, que a su vez consumen recursos materiales, energéticos y humanos, entre otros. A diferencia de la industria, la agricultura tiene componentes que no se pueden intervenir, como, por ejemplo, las variables climáticas, la presencia de plagas o las condiciones locales de cada cultivo, como la calidad del suelo o el agua de riego disponible. Por ello, es necesario contar con herramientas que, en la medida de lo posible, nos den información precisa y frecuente sobre las variables y las condiciones en las que se desarrollan los cultivos.

La agricultura digital consiste en el uso de nuevas y avanzadas tecnologías, que permiten que el sector agrícola en su conjunto aumente la productividad y mejore la eficiencia de los procesos. La mayoría de los agricultores de hoy en día toman decisiones como la cantidad de fertilizante que deben aplicar, basándose en una combinación de mediciones aproximadas, experiencia y recomendaciones. Una vez que se decide un curso de

acción, se implementa, pero los resultados normalmente no se ven hasta el momento de la cosecha. Por el contrario, un sistema agrícola digital recopila datos con mayor frecuencia y precisión, a menudo combinados con fuentes externas (como información meteorológica). Los datos combinados resultantes se analizan e interpretan para que el agricultor pueda tomar decisiones más informadas y con anticipación. Los datos se recopilan con sistemas de detección, que puede ser remota cuando los datos se capturan por plataformas aéreas (drones, avionetas) o espaciales (satélites), o próxima cuando los sensores de captura de datos están en el suelo. Posteriormente, las decisiones del agricultor se pueden implementar rápidamente con mayor precisión mediante robótica y maquinaria avanzada, y los agricultores pueden obtener comentarios en tiempo real sobre el impacto de sus acciones.

Las tecnologías utilizadas en una agricultura digitalizada incluyen sensores, redes de comunicación, sistemas de aviación no tripulados (drones), inteligencia artificial (IA), robótica y otra maquinaria avanzada y, a menudo, se basan en los principios del *"Internet de las cosas"*. Cada una de estas tecnologías aporta algo valioso a la agricultura, desde la recopilación de datos hasta la gestión y el procesamiento, así como la orientación y la dirección. Este sistema integrado ofrece nuevos conocimientos que mejoran la capacidad de toma de decisiones y su implementación rápida y con mayor precisión mediante robótica y maquinaria avanzada en un marco de agricultura de precisión.

La agricultura digital tiene el potencial de hacer que la agricultura sea más productiva, más consistente y de utilizar el tiempo y los recursos de manera más eficiente. Esto tiene ventajas importantes para los agricultores ya que presenta el potencial de transformar la forma en que producimos los alimentos. Sin embargo, el enfoque aún es relativamente nuevo para un sector tan tradicional como el agrícola. Los costos son todavía altos y los detalles de los beneficios a largo plazo, a veces, no se ven con claridad. Eso significa que asegurar su adopción generalizada requerirá un esfuerzo de divulgación, colaboración y consenso en toda la cadena de valor sobre cómo superar estos desafíos.

Uno de los retos más importantes es la obtención de datos que sean fiables y sobre todo útiles para el agricultor, obtenidos en una escala adecuada, con la frecuencia necesaria para observar el cultivo, sus variaciones y su evolución.

6.5.1. Captura de datos.

Como se ha mencionado en la introducción, la Agricultura de Precisión es una estrategia de gestión que recoge, procesa y analiza datos temporales, espaciales e individuales. En este contexto, el sector agrícola genera una ingente cantidad de datos que pueden ser recopilados mediante herramientas de teledetección. Ahora bien, para que estos datos sean realmente aprovechables, deben convertirse en información útil que permita al agricultor tomar decisiones de manejo para reducir insumos, anticiparse a los problemas, maximizar beneficios y reducir el impacto medioambiental.

El valor de un dato como puede ser un índice vegetativo en el ámbito de la teledetección en agricultura, (índices que serán explicados en apartados posteriores) de una planta, es irrelevante a menos que se sitúe en un contexto espacio-temporal que le dé un significado y lo convierta en información útil para la toma de decisiones. Por ejemplo, el vigor vegetativo indicado por un índice NDVI se puede relacionar con la edad de

las hojas y puede variar en una parcela a lo largo del tiempo como consecuencia de diferencias en el estado nutricional en distintas zonas de la parcela como muestra la Figura 47. Este conocimiento es el que nos permite tomar decisiones de manejo.

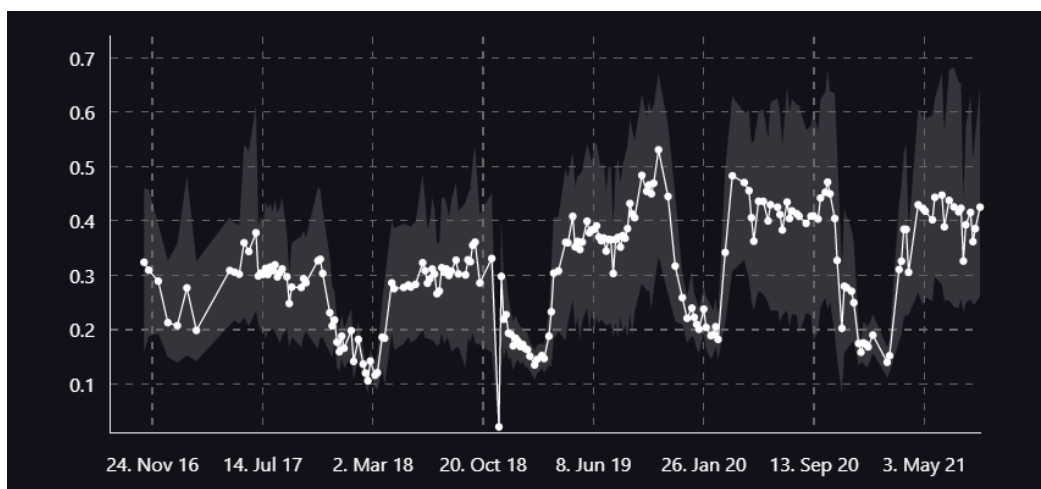


Figura 47. Gráfico de evolución del NDVI, en el que se aprecia las variaciones estacionales (caída de en invierno) y la evolución interanual.

La primera fase en una estrategia de Agricultura de Precisión es la obtención de los datos. Este proceso se puede realizar mediante teledetección. La *teledetección* es observación remota de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas aéreas o espaciales que permite una recogida de datos de las escenas observadas. En este proceso de acopio, encontraremos información de diversa naturaleza y complejidad capturada con diferentes tecnologías como, por ejemplo, imagen hiperespectral, multispectral o térmica. Dentro de las características o magnitudes a tener en cuenta en la toma de datos unas de las principales son la resolución espacial y la frecuencia de captura de los datos.

A. Resolución espacial y temporal.

El uso de la detección a través de sensores para obtener la distribución en una parcela del estado de las plantas ha evolucionado considerablemente en las últimas tres décadas y puede realizarse a diferentes escalas, dependiendo del área a monitorear, así como de la resolución espacial y espectral requerida. Las soluciones propuestas incluyen el establecimiento de herramientas de detección para programas de diagnóstico precoz. Sin embargo, la representatividad de los diagnósticos depende en gran medida de un diseño de muestreo adecuado, que puede incluir desde la parcela completa a niveles de plantas individuales.

La resolución espacial de un sensor de imagen es una de las principales características a tener en cuenta en una aplicación de teledetección. Esta magnitud determina el tamaño del objeto más pequeño que puede representar de manera coherente. Entendiendo que la resolución espacial se refiere a la finura de detalles visibles en una imagen, la capacidad de un sensor para obtener componentes individuales en las imágenes depende también del tamaño de estos componentes. No es lo mismo un cultivo de árboles, de cereal o de hortalizas. En este sentido, existe una gran diferencia entre monitorear las grandes extensiones de cereal, con características similares, que existen en el centro de España a las relativamente pequeñas parcelas de cultivos

frutales propias de la parte mediterránea. La resolución temporal indica la frecuencia con la que se realizan las adquisiciones de los datos, o sea, la periodicidad de adquisición de imágenes de una misma zona.

Las plataformas de captura de datos presentan diferente resolución tanto espacial y permiten diferentes resoluciones temporales. Por tanto, a la hora de establecer una estrategia de captura de datos agronómicos, es importante conocer la frecuencia con la que se necesita observar la evolución del cultivo y la escala que se necesita (información a nivel de panta, parcela o paisaje). Con ello, se escogerá la plataforma, o combinación de plataformas, más adecuada para hacerlo, por ejemplo drones, avión tripulado o satélites. Por ejemplo, un dron siempre ofrecerá una mayor resolución espacial que un satélite, por lo que será adecuado para monitorear pequeñas parcelas de cultivo con un elevado nivel de detalle. Sin embargo, el satélite permite monitorear grandes extensiones de terreno con una resolución espacial relativamente baja, pero con la ventaja de una elevada resolución temporal. En cuanto a la resolución espacial, el satélite Landsat 7 puede ver la misma área de la superficie terrestre cada 16 días y el Sentinel 2 cada 5 días. No obstante, cuando es necesario obtener datos con una alta frecuencia de una zona relativamente grande, se puede utilizar la información satelital. Y esta información se puede comparar con vuelos dron realizados en diferentes estados fenológicos de la planta para enriquecerlo, así, de una mayor resolución espacial (8 cm píxel).

B. Características espectrales de la Vegetación.

Los equipos usados en teledetección miden la radiación reflejada por la tierra en determinados rangos del espectro electromagnético (firma espectral). Esta característica permite distinguir entre los diferentes integrantes de la tierra; por ejemplo, zonas de agua, suelo desnudo, vegetación, construcciones etc. Los diferentes componentes presentan firmas espectrales muy diferentes y fácilmente identificables (Figura 48).

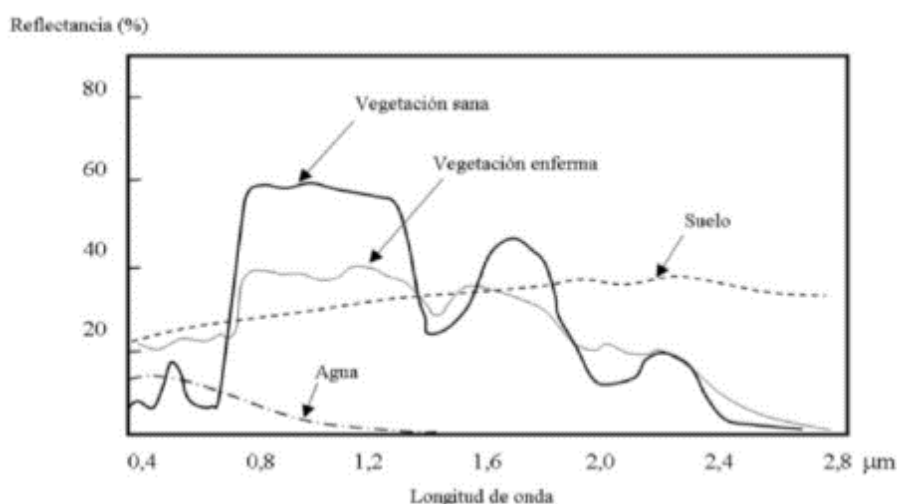


Figura 48. Comparación entre la respuesta espectral de la vegetación sana y la vegetación [45].

En lo que se refiere a la vegetación, esta radiación depende, en gran medida, de sus componentes bioquímicos, su actividad fotosintética y su estructura interna. Las hojas sanas y estresadas o enfermas, presentan firmas espectrales diferentes. La Figura 49 representa un corte transversal de una hoja sana, mostrando su estructura interna y las superficies interna y externa están tapizadas por una simple capa de células epidérmicas carentes de clorofila y recubiertas por una delgada película de ceras.

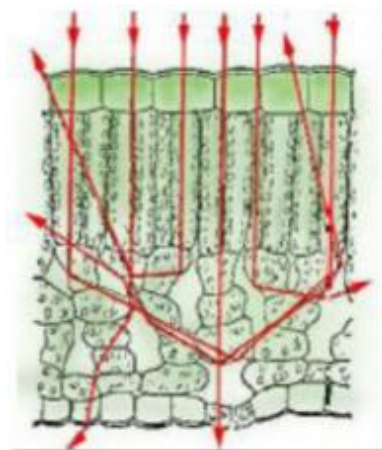


Figura 49. Corte transversal de una hoja y la distribución de la radiación por su estructura.

El tejido mesodérmico entre las dos epidermis está formado por dos capas. La capa superior contiene células oblongas dispuestas en forma regular y ordenada (tejido en empalizada). Estas células son ricas en las clorofilas a y b que están contenidas en cuerpos subcelulares denominados cloroplastos, componentes predominantes del grupo de cromoplastos, que también contienen pigmentos como xantofilas y carotenos. En la capa inferior, el tejido mesodérmico es esponjoso, formado por células de forma irregular, débilmente empaquetadas, dejando entre ellas numerosos espacios intercelulares y cavidades de aire. Generalmente, sólo una pequeña fracción de la radiación incidente es reflejada directamente por la superficie externa, pues la cutícula y la epidermis son casi transparentes al visible y al IR cercano. Otra fracción de radiación puede ser transmitida directamente a través de la hoja. Finalmente, el resto de la radiación sufre interacciones con la estructura interna de la hoja. Parte de ella puede ser absorbida por los pigmentos de la hoja, pero una fracción importante sufre reflexiones y refracciones múltiples en el tejido esponjoso.

Debido a esa asociación entre características bioquímicas y espectrales, una forma de identificar vegetación que presenta algún tipo de problema o característica específica, es combinar estas longitudes de onda en busca de valores o patrones que se alejen de los que presentan las plantas sanas. Estas combinaciones se recogen mediante lo que se denomina índices vegetativos [46], explicados más adelante. Cuando los índices vegetativos se obtienen a partir de imágenes hiper o multispectrales, el resultado permite obtener una nueva imagen donde se destacan gráficamente determinados *píxeles* relacionados con parámetros de las *coberturas vegetales* como son la densidad, el índice de *área foliar* o la actividad *clorofílica*. Generalmente, los índices vegetativos utilizan longitudes de onda relacionadas con compuestos bioquímicos de las plantas. Por ejemplo, en la región visible del espectro, los carotenos y las xantofilas absorben con tres picos máximos entre 420 y 503 nm. El betacaroteno causa una coloración de amarillo a rojo anaranjado debida a un pico de absorción cercano a los 475 nm. Las xantofilas, luteína y violaxantina, muestran un pico de absorción sobre 435 nm, con una fuerte absorción en el rango de 350 a 500 nm. La absorbancia en la región verde (alrededor de 530-550 nm), es debida a un complejo de antocianina. Y La absorbancia de clorofila en las regiones azul y roja está bien descrita, siendo el pico encontrado en 680 nm uno de los más utilizados en los índices espectrales. Por su parte, en el IR cercano, la reflectividad en la región de 700 nm a 1300 nm se ve influenciada por la estructura interna de la hoja, mientras que para valores superiores a 1300 nm aparecen picos de absorción en torno a 1400 nm, 1900 nm y 2700 nm asociados a las bandas de absorción del agua.

Resumiendo, se puede decir que, en una hoja sana (Figura 50), las características espectrales de la radiación absorbida o reflejada por una hoja en la región visible dependen, fundamentalmente, de la absorción de radiación por parte de los pigmentos de la hoja, En caso de tratarse de vegetación enferma, se verán mermadas sus capacidades de realizar la fotosíntesis y la evapotranspiración y, por esta razón, presentaría una firma espectral diferente.

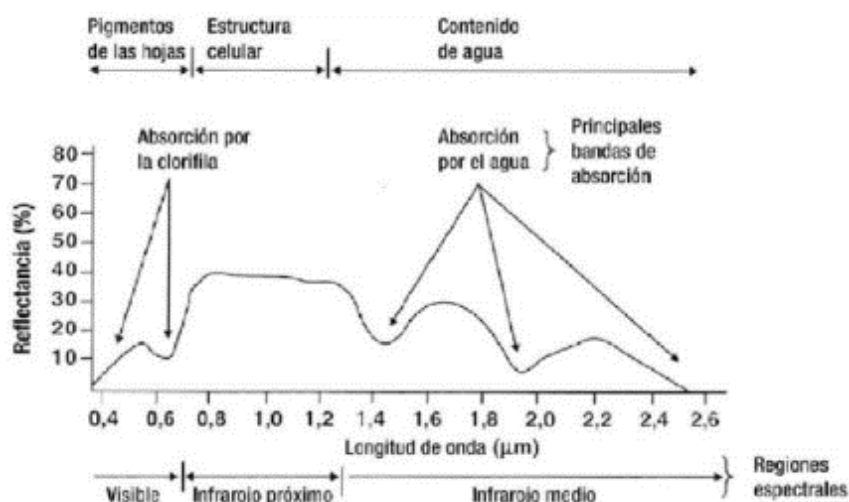


Figura 50. Curva de reflectividad para la vegetación sana.

En general, la firma espectral se comporta en las plantas como se ha descrito; sin embargo, existen factores algunos factores externos a la propia hoja que influyen en esa firma espectral. Uno de los que más influyen cuando se mide vegetación mediante sensores de teledetección es el área foliar de la planta, representada normalmente por el denominado índice de área foliar (LAI). Como se puede ver en la Figura 51, cuanto mayor sea el índice de área foliar, más radiación refleja la planta.

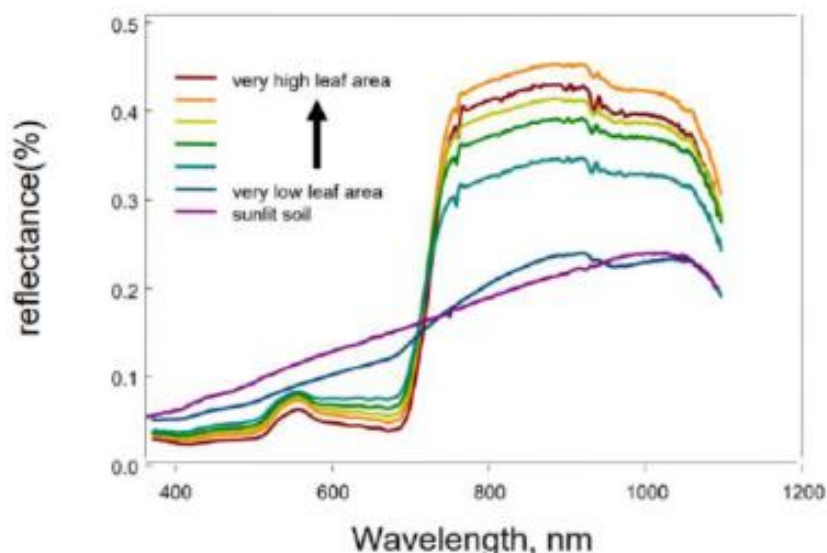


Figura 51. Porcentaje de reflectancia en función del índice de área foliar de la planta (LAI).

Otro de los factores que influyen es la edad de las hojas, éstas cuando alcanzan su madurez, empiezan su senescencia deteriorándose su estructura interna. Por esta razón, absorben menos radiación y reflejan más,

tal y como muestra la imagen 52. Por tanto, es importante distinguir en un primer momento la edad de las hojas donde se capturan los datos y no se deberían tener en cuenta las senescentes a la hora de estimar índices relacionados con la nutrición. Sin embargo, los equipos de teledetección capturan las áreas más externas de la vegetación, que está compuesta principalmente por hojas jóvenes, lo que puede conducir a determinaciones inexactas ya que la brotación que nos informa acerca del diagnóstico nutricional de la plantación no siempre coincide con esas capas más externas de las plantas sobre la que los dispositivos de teledetección capturan los datos.

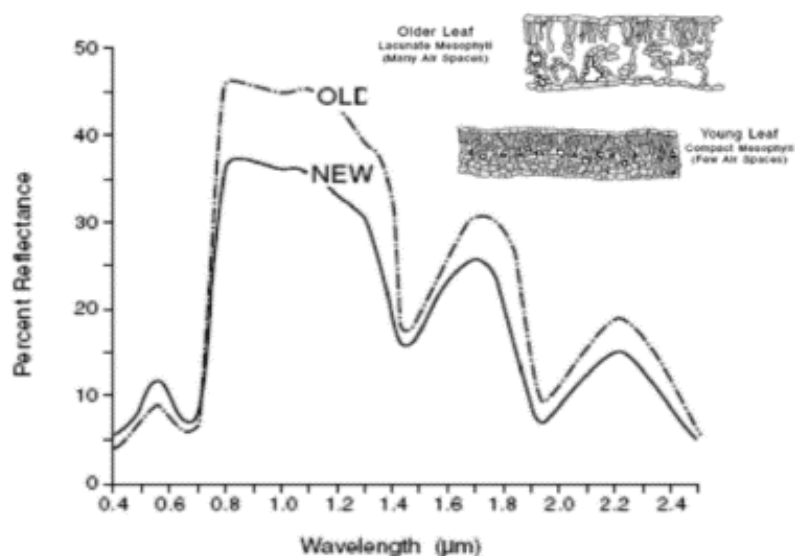


Figura 52. Porcentaje de reflectancia de hojas nuevas y viejas.

Por último, el contenido relativo del agua en la planta influye de una manera decisiva en el nivel de reflectancia. El agua absorbe una gran parte de la radiación que recibe la planta; por ello, cuanto más contenido en agua tenga, menor será la reflectancia. Como se puede ver en la Figura 53, cuanto menor sea el contenido de agua en la planta, menos radiación podrá absorber. Esto puede servir como indicador para detectar un estrés hídrico de la planta cuando se observa la evolución del espectro obtenido.

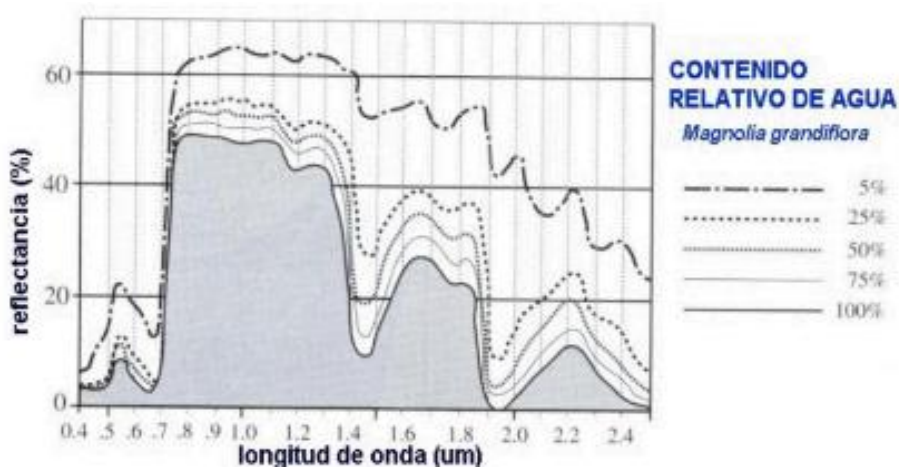


Figura 53. Porcentaje de reflectancia en función del contenido relativo de agua [47].

El uso de teledetección permite, por tanto, distinguir cultivos y detectar las zonas dedicadas a cada especie, debido a que cada especie presenta una firma espectral característica (Figura 54).

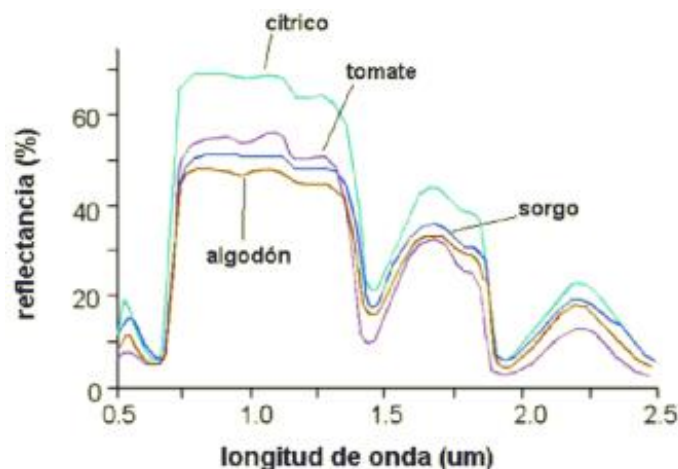


Figura 54. Firmas espectrales de hojas de distintas especies vegetales.

6.5.2. Plataformas para la captura de datos.

A continuación, se describen brevemente algunas plataformas que pueden utilizarse en el campo de la Agricultura de Precisión orientada al riego y a la fertilización.

A. Detección próxima.

Como se ha comentado, la detección en agricultura recopila información estudiando la radiación emitida, reflejada y transmitida por la vegetación. Los sensores utilizados para obtener esta información pueden estar basados en cámaras de color, sistemas de imágenes multi o hiper espectrales, espectrómetros o cámaras termográficas, que miden la energía electromagnética proveniente de la vegetación en diferentes rangos espectrales o en longitudes de onda particulares. Ya se ha indicado, que esta radiación se ve afectada por varios componentes estructurales y bioquímicos de las plantas, como el área foliar, la porosidad, el contenido de clorofila y agua o la concentración de nutrientes, que pueden cambiar y dar lugar a síntomas (estrés, deficiencias) potencialmente detectables por estos dispositivos [48]. La elección de un dispositivo u otro o la plataforma sobre la que va montado, dependerá de las necesidades particulares de cada cultivo, la escala espacial y temporal requerida y el problema que se desee monitorear.

Los satélites son necesarios para cubrir regiones muy grandes y no se necesita una gran resolución espacial. Los aviones tripulados son la única alternativa para obtener mapas a escalas mayores con una resolución espacial y espectral óptima, con la ventaja de que pueden incorporar sensores complejos y cubrir grandes distancias, aunque a un precio elevado. Sin embargo, cuando bajamos a nivel de parcela o de planta, la información espectral se debe recopilar con una alta resolución espacio temporal. Los sensores para este propósito se pueden montar en drones para obtener imágenes de bajo costo con resoluciones espaciales de 1 a 100 cm. Sin embargo, cuando se requieren resoluciones espaciales más altas (desde la planta hasta el nivel de la hoja), los dispositivos portátiles o sensores montados en vehículos terrestres (detección próxima) son una buena solución [49].

Sensores portátiles.

Los sensores portátiles ofrecen algunas ventajas clave, como es la posibilidad de obtener mediciones instantáneas in situ y, además, de seleccionar las hojas que se desean medir. Si el objetivo es monitorizar el estado nutricional o evaluar la idoneidad de un programa de fertilización, es conveniente medir hojas de árboles similares, de la misma edad, variedad y portainjerto. Por el contrario, si el objetivo es diagnosticar un problema específico, se deben escoger hojas con síntomas, de crecimiento irregular o con aparentes síntomas del problema que se desea controlar, como deficiencias nutricionales. En este caso, es conveniente muestrear también hojas sin síntomas de árboles similares para poder establecer comparaciones.

Algunos de los sensores más utilizados para medir la concentración de nitrógeno in situ, suelen ser los medidores de clorofila de hojas. Estos, son dispositivos de pequeño tamaño que permiten obtener medidas sin necesidad de cortar y procesar muestras de hojas. Las medidas se consiguen proyectando una luz a través de una hoja, recogiendo la luz transmitida para obtener el valor de la radiación obtenida en unas longitudes de onda concretas. La presencia de clorofila en las hojas de las plantas está estrechamente relacionada con las condiciones nutricionales de la planta, ya que el contenido de clorofila se incrementa proporcionalmente con la concentración de nitrógeno presente en la hoja. Los medidores de clorofila determinan la cantidad relativa de clorofila midiendo la absorción espectral de la hoja en dos longitudes de onda, que suelen estar alrededor del rojo (que presenta un fuerte pico de absorción) y del infrarrojo cercano (que no presenta absorción por la clorofila). Utilizando los valores obtenidos, se obtiene un índice que es proporcional a la cantidad de clorofila presente en la hoja y, en consecuencia, por tanto, de Nitrógeno (N). Entre los medidores de clorofila más utilizados se encuentran el SPAD-502 (Konica Minolta Sensing Europe B.V., Nieuwegein, Holanda) y el CCM-200 (Opti-Sciences, Inc., Hudson, NH, EE. UU.). La Figura 55 muestra algunos medidores de clorofila comerciales de mano (miden la reflexión de la luz) y de pinza (miden por transmisión).



Figura 55. Diferentes tipos de medidores comerciales de clorofila. Izquierda: FieldScout CM 1000 Chlorophyll Meter (Spectrum Technologies, Inc., Aurora, IL, Estados Unidos). Derecha: Chlorophyll Meter. SPAD 502Plus (Konica Minolta Sensing Europe B.V.).

Si bien, en este momento, los medidores comerciales de clorofila son el dispositivo más utilizado para medir la concentración de algunos nutrientes en hojas, una alternativa con más posibilidades son los espectrómetros portátiles. Mientras que los medidores de clorofila ofrecen valores basados en dos longitudes de onda concretas, los espectrómetros miden todo el espectro en el rango de trabajo del dispositivo, lo que ofrece mayores ventajas. En la parte visible del espectro se encuentran picos de absorción relacionados con determinados pigmentos, incluida la clorofila, pero también carotenos, xantofilas o antocianinas. Y en la

región del infrarrojo cercano, podemos encontrar bandas de absorción características relacionadas con el agua, y, por lo tanto, con el contenido de humedad. Estas bandas son principalmente 1450 nm y 1940 nm y, en menor medida, 970 nm. A diferencia de los medidores específicamente diseñados para obtener valores relacionados con la clorofila, los espectros se deben analizar mediante técnicas estadísticas apropiadas que determinen, o bien las longitudes de onda más importantes, o bien correlaciones entre los espectros obtenidos y las características o nutrientes que se desean medir. Para ello, es necesario obtener los valores reales de referencia para crear modelos estadísticos que sean precisos y robustos. En este sentido, uno de los problemas que presentan los espectrómetros es que a veces es necesario calibraciones que son complejas, o que los modelos creados son específicos para determinadas condiciones, como por ejemplo la variedad, las condiciones climáticas o la época del año, lo que los convierte en instrumentos de laboratorio más que en herramientas de campo propiamente dichas. En este sentido, la tendencia es hacia la miniaturización de los espectrómetros y la creación de pequeños equipos de procesamiento de datos, por lo que es importante seguir investigando en la creación de modelos, especialmente utilizando novedosas técnicas de inteligencia artificial que permitan el desarrollo de equipos portátiles flexibles, fáciles de utilizar y que ofrezcan información, no solo del contenido de clorofila y humedad, sino también del estado nutricional completo del árbol. El objetivo sería lograr equipos que obtengan y procesen datos de forma que ayuden a la elaboración de recomendaciones de riego y abonado particularizadas para cada cultivo, condición climática y época.

Otro tipo de dispositivo con gran futuro en agricultura es el teléfono inteligente. En la actualidad, sus funciones como dispositivo para obtener concentración de nutrientes o estado hídrico son mínimas, pero, debido a su amplio uso, precio económico y facilidad de manejo, se están dando pasos para convertirlo en una herramienta útil para el agricultor. Por ejemplo, ya existen dispositivos comerciales que convierten un teléfono móvil inteligente en un espectrómetro de radiación visible. Su mayor limitación es, precisamente, que sólo capturan imágenes o información en el espectro visible. Aun así, utilizando algunas ratios basadas en las coordenadas roja, verde y azul de imágenes de hojas capturadas apoyando la hoja sobre la lente de la cámara, se han encontrado correlaciones relativamente buenas entre estos valores y el contenido medido de clorofila para hojas jóvenes [50]. Estos dispositivos se convertirán en los próximos años en herramientas claves en una agricultura digitalizada, no sólo como dispositivos capaces de obtener información, sino por su capacidad para procesarla y ofrecer la información de manera fácil, inmediata y comprensible, a través de aplicaciones especialmente diseñadas. Además, es posible conectar otras herramientas como, por ejemplo, cámaras térmicas, lo que permite ampliar su rango de aplicación.

[Sensores montados en robots o vehículos agrícolas.](#)

Algunos de los sensores que requieren contacto o mucha proximidad con la planta, se deben manejar de forma manual a nivel de planta. Pero, cuando es importante conocer la distribución espacial u obtener variaciones temporales del problema que pretendemos observar como la determinación automática del estado hídrico o nutricional del cultivo en tiempo real, para confeccionar mapas útiles para el diseño de estrategias de cultivo, se pueden usar sensores montados en drones, vehículos o robots agrícolas. Este es el caso de cámaras de color, térmicas o espectrales (multi o hiperespectrales). Sin embargo, todo este proceso entraña varias dificultades operativas. Por una parte, la complejidad de capturar imágenes de calidad ante condiciones de iluminación variables e impredecibles mediante sistemas de visión artificial. Por otro lado, la necesidad de

situar cada imagen en un marco de referencia geográfica común e inequívoco y, finalmente, el reto de plasmar toda esta información en un formato claro y asequible a cualquier usuario inexperto en tecnologías de la información. Estos retos han sido parte de la causa de un bajo nivel de adopción de estas tecnologías por el sector, pero el avance en la miniaturización de los sensores, la robotización y el aumento de velocidad de procesado, junto con la reducción de precios en componentes electrónicos, sin duda va a proporcionar un fuerte impulso a estas tecnologías en los próximos años, bien mediante el uso de drones o con la expansión de robots especializados.

En la actualidad, un dron permite obtener datos de áreas extensas en poco tiempo. Sin embargo, el escenario normativo actual para volar drones es incierto, la autonomía es aún escasa y los equipos que pueden incorporar son sencillos. Además, existen numerosas restricciones que impiden que puedan sobrevolar determinadas zonas y, en los casos en los que se permite, a veces hace falta una autorización administrativa que no siempre es fácil de obtener. La Normativa de drones en España, se aplica según los Reglamentos Europeos RE-2019/947 (<https://www.boe.es/doue/2019/152/L00045-00071.pdf>) y RD-2019/945 (<https://www.boe.es/doue/2019/152/L00001-00040.pdf>) y según el Real Decreto 1036/2017 (<https://www.boe.es/boe/dias/2017/12/29/pdfs/BOE-A-2017-15721.pdf>), que seguirá vigente, al menos, hasta el 1 de enero de 2022.

Estas dificultades hacen que, en casos donde los vuelos no son posibles o se necesite una resolución espacial muy alta, se utilicen vehículos o robots agrícolas para transportar los sensores y recopilar la información del cultivo. Uno de los sensores más utilizados se basa en la captura de imágenes hiperespectrales. El funcionamiento de las cámaras hiperespectrales es similar a un espectrómetro, pero, a diferencia de éste, que sólo puede captar la información de un punto, una cámara hiperespectral nos da el espectro de cada uno de los píxeles de la imagen capturada (Figura 56). Así, se obtiene lo que se conoce como un hipercubo, en el que, además de las dos coordenadas espaciales típicas de las imágenes de color, hay una tercera coordenada que da la información espectral. Por lo tanto, estas cámaras ofrecen información espacial y espectral de toda la escena capturada, permitiendo distinguir diferentes componentes estructurales del árbol y obtener información sobre cómo se distribuyen sus características. Por ejemplo, permiten distinguir entre hojas jóvenes y hojas viejas y así centrar la determinación de la concentración de nutrientes solamente donde es necesario. Los sistemas hiperespectrales más utilizados, permiten obtener información en el rango del visible e infrarrojo cercano del espectro (400 a 1000 nm), aunque existen cámaras capaces de obtener información hasta 1700 nm e incluso 2500 nm, pero con un precio muy superior [51].

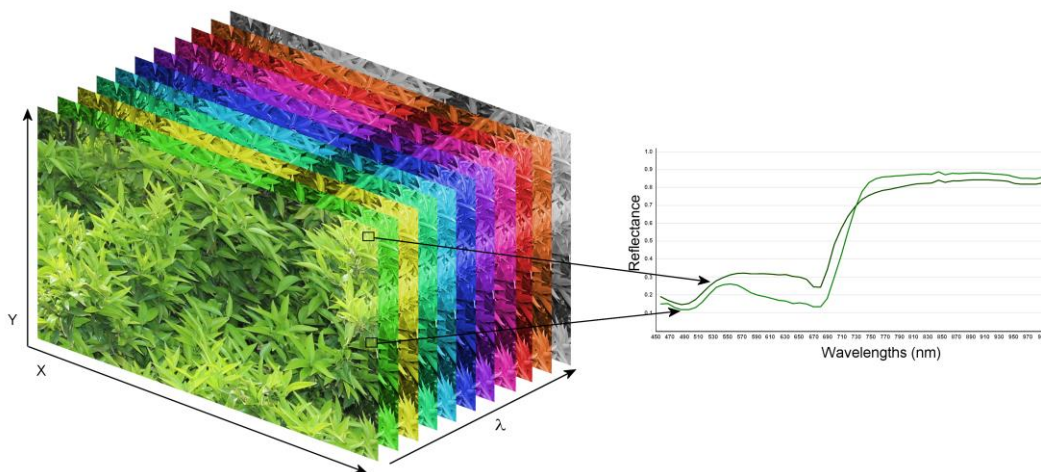


Figura 56. Representación de una imagen hiperespectral.

Una de las mayores dificultades a la hora de usar estos equipos son las complejas calibraciones necesarias para crear modelos robustos capaces de predecir la concentración de cada nutriente o el estado hídrico del árbol. Para realizar estas calibraciones, es necesario usar algunos de los índices vegetativos que nos den el valor estimado para el nutriente estudiado, o bien entrenar modelos estadísticos específicos, creados mediante técnicas de quimiometría o de inteligencia artificial. Una vez entrenados y validados los modelos, el sistema nos indicará, dada una imagen de un árbol, cuál es la distribución de la concentración de nutrientes en ese árbol.

Otro dispositivo muy utilizado, especialmente para detectar estrés en el árbol, son las cámaras térmicas. Cuando un árbol sufre, por ejemplo, estrés hídrico, cierra sus estomas, lo que puede provocar un aumento de la temperatura de las hojas. Esta variación se puede detectar mediante una cámara térmica.

Una de las principales características de estos vehículos o robots sensorizados, es que disponen de sistemas de geoposicionamiento que permiten relacionar los datos obtenidos con el lugar exacto en el que se obtienen. Esto permite presentar la información de la parcela en mapas de manera útil y comprensible a los agricultores, ofreciendo información individualizada de cada árbol, fila o zona de la parcela [52]. La Figura 57 muestra un robot agrícola sensorizado utilizado durante los ensayos del proyecto GoCitrics.



Figura 57. Robot agrícola sensorizado del IVIA, utilizado en los ensayos del proyecto GoCitrics.

B. Detección remota.

La teledetección es un tipo de tecnología que recopila datos detectando la radiación electromagnética (EM) de los ecosistemas terrestres, atmosféricos y acuáticos de la Tierra para detectar y monitorear las características físicas de un área sin hacer contacto físico. Estos sensores pueden estar en satélites, montados en aviones o en drones. A diferencia de la detección próxima, la detección remota no requiere que el sensor o la plataforma que lo transporta esté en contacto con el suelo. Generalmente, los sensores son pasivos o activos. Los sensores pasivos responden a estímulos externos, recolectando radiación que es reflejada o emitida por un objeto o el espacio circundante. La fuente de radiación más común medida por teledetección pasiva es la luz solar reflejada. Algunos de los sensores pasivos más utilizados incluyen cámaras estándar, multispectrales, hiperespectrales o térmicas. Los sensores activos utilizan energía para escanear objetos y áreas, y miden la energía reflejada. RADAR y LiDAR son herramientas típicas de detección remota activa que miden el tiempo de demora entre la emisión y el retorno para establecer la distancia a un objeto. Los datos de teledetección recopilados se procesan y analizan con hardware y software de teledetección, que está disponible en una variedad de aplicaciones patentadas y de código abierto. En las próximas secciones, se va a profundizar en el uso de drones y satélites.

Uso de drones.

Los drones son una de las plataformas más en boga para la captura de datos agrícolas debido a su sencillez, relativo bajo coste y alta resolución (del orden de centímetros por píxel). Por el contrario, presentan algunos inconvenientes como una relativamente pequeña carga de pago, escasa autonomía y dificultades para poder realizar vuelos en determinadas zonas. Para poder volar un dron, es necesario cumplir con varios requisitos básicos, como cumplir la legislación vigente. En este sentido, una herramienta útil para comprobar los requisitos administrativos es la plataforma de ENAIRE, que es el gestor de navegación aérea de España (<https://www.enaire.es>). En esta plataforma, se puede seleccionar el área de vuelo según el plan previsto, revisar si existen limitaciones para realizar las operaciones y/o si se requieren permisos especiales.

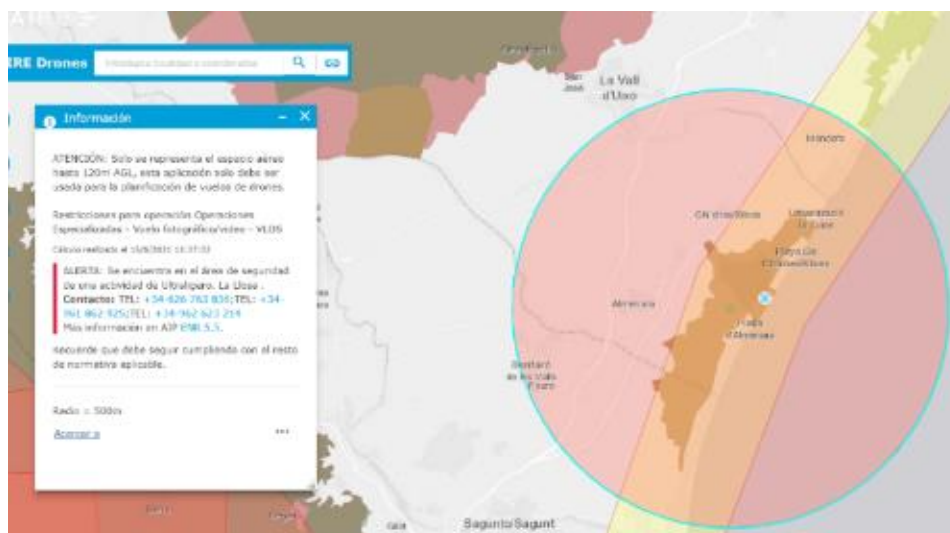


Figura 58. Ejemplo planificación Enaire.

Una vez se dispone de los permisos legales y administrativos hay que preparar la misión de vuelo. Para ello, hay que tener varias cosas en cuenta.

Plan de vuelo: es muy importante analizar previamente la zona de vuelo, las propiedades del cultivo o las necesidades del problema a resolver, como la resolución necesaria para planificar y optimizar el vuelo. Con un software específico, se planifica el área a volar y se tienen en cuenta otros parámetros de importancia como la altura de vuelo. Para ello, es muy importante conocer el terreno, tener en cuenta obstáculos como tendidos eléctricos o construcciones cercanas y determinar zonas seguras de despegue y aterrizaje. Existe un software que facilita esta tarea y que, además, permite el seguimiento de la operación por telemetría, controlando en todo momento la posición del dron y sus parámetros asociados, así como los mecanismos de seguridad.



Figura 59. Ejemplo de planificación de vuelo con software.

Plataforma de vuelo: existe gran diversidad de drones en el mercado con muy diversa autonomía y carga de pago (peso que pueden transportar), por lo que es muy importante escoger uno que se adapte a las necesidades específicas del problema. La mayoría de ellos son multirrotores eléctricos, con una carga máxima

de unos 5 kilos y una autonomía de unos 20 minutos. Además, existen drones con motores de combustión (gasolina) o de ala fija (Figura 60). Los multirrotores se caracterizan por contar con rotores independientes que regulan el movimiento del aparato y le permiten despegar y aterrizar de forma vertical. Los drones de ala fija son similares en estructura a los aviones y su movimiento viene determinado por dispositivos móviles en las alas y un rotor de impulsión trasero. Estos últimos tienen una mayor autonomía y pueden cubrir áreas más extensas; por el contrario, su maniobrabilidad es mucho menor. Escoger uno u otro dependerá de las necesidades específicas de cada problema, aunque los más utilizados son en la actualidad los multirrotor eléctricos.



Figura 60. Ejemplo de drones multirrotor (dos primeros a la izquierda) y ala fija (dos a la derecha).

Sensores: Una de las mayores limitaciones de los drones es su reducida carga de pago, por lo que solo pueden cargar sensores o cámaras de pequeño tamaño. Lo más habitual en la actualidad es que dispongan de cámaras de color, multispectrales (Figura 61) o térmicas. En el caso de las cámaras multispectrales específicas para drones, las más utilizadas permiten capturar unas cinco bandas que incluyen las necesarias para obtener imágenes de color, una banda cercana a lo que se denomina borde rojo (alrededor de 700 nm) y alguna banda infrarroja. La selección de estas bandas está relacionada con el cálculo de determinados índices vegetativos.

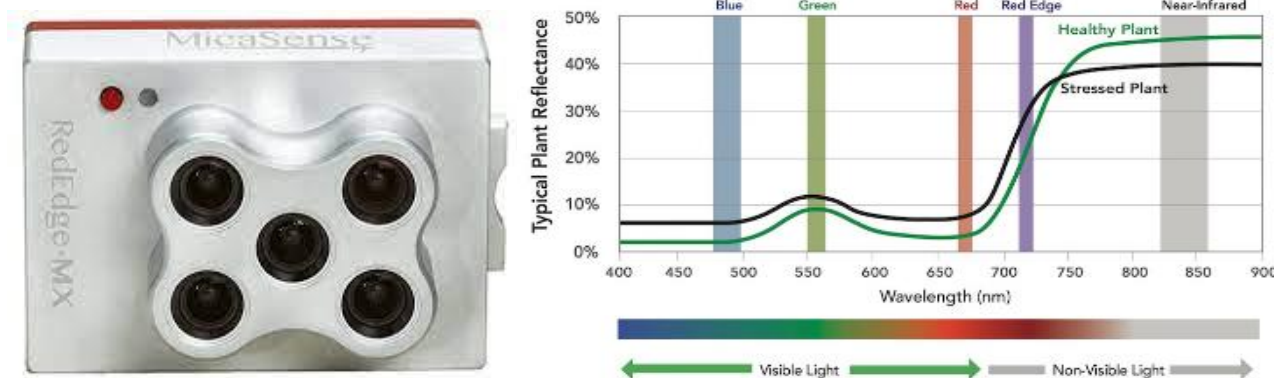


Figura 61. Cámara multispectral RedEdge-MX (Micasense Inc., Seattle, Washington, EE.UU.) con cinco sensores (rojo, verde, azul, borde rojo, infrarrojo)

Una vez completada la misión de vuelo, se obtienen múltiples imágenes por cada sensor o en cada una de las bandas capturadas que es necesario corregistrar (unir) para obtener un mapa completo de la parcela monitoreada. Una vez obtenidas las imágenes, se deben procesar para que adquieran un significado útil para el agricultor, que se presentan en forma de capas o mapas del cultivo. Como se ha indicado, este procesamiento consiste en la combinación de las diferentes bandas de la imagen, mediante distintas fórmulas

para obtener los índices vegetativos y, en este caso, el índice se obtiene para cada píxel de la imagen. La proyección del valor de cada píxel en el mapa nos permite observar las variaciones dentro de la parcela. De igual forma, se pueden obtener imágenes mediante el vuelo del dron con cámaras térmicas que nos indiquen la temperatura de los cultivos o, incluso, combinaciones de ambas cámaras para obtener otros valores relacionados con algunos estreses, plagas, necesidad de riego o fertilización o cualquier otra variable agronómica (Figura 62).

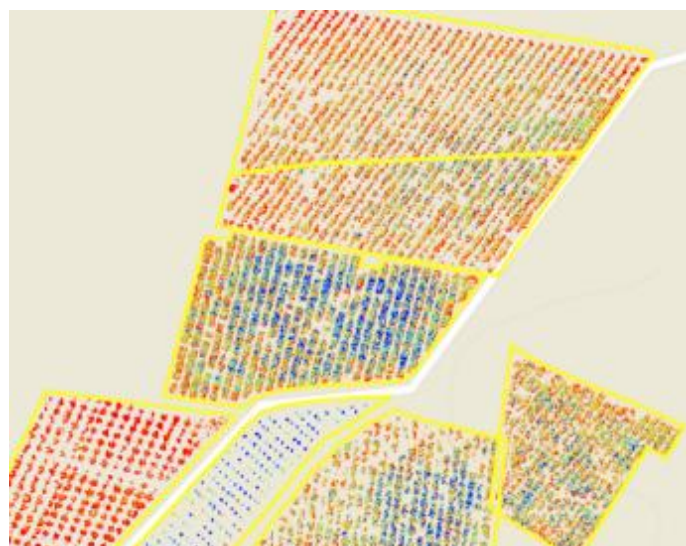


Figura 62. Mapa de nitrógeno foliar útil para el seguimiento de la fertilización



Figura 63. Ejemplo de visualización en la plataforma LAYERS de una parcela volada con dron (8 cm de resolución)

Uso de satélites.

En ocasiones se necesitan cubrir áreas más extensas o una mayor resolución temporal de la que ofrecen los drones. Cuando se necesita un seguimiento continuo del ciclo de cultivo durante toda la campaña, la información proveniente de satélites como las misiones LANDSAT o SENTINEL, que ofrecen imágenes

gratuitas, es muy útil. Por ejemplo, Sentinel 2 cuenta con un sensor multispectral de 13 bandas distribuidas entre el espectro visible y el infrarrojo cercano y revisita cada 5 días las zonas de interés, manteniendo los mismos ángulos de visión y permitiendo, de esta manera, obtener información comparable a lo largo del tiempo. La principal desventaja es una resolución relativamente baja (entre 10 y 60 metros por píxel).

Tabla 7. Longitudes de onda Sentinel.

Banda	Resolución	Longitud de onda	Descripción
B2	10 m	490 nm	Blue
B3	10 m	560 nm	Green
B4	10 m	665 nm	Red
B9	60 m	940 nm	Short Wave Infrared (SWIR)
B10	60 m	1375 nm	Short Wave Infrared (SWIR)
B11	20 m	1610 nm	Short Wave Infrared (SWIR)
B12	20 m	2190 nm	Short Wave Infrared (SWIR)
B1	60 m	443 nm	Ultra blue (Coastal and Aerosol)
B5	20 m	705 nm	Visible and Near Infrared (VNIR)
B6	20 m	740 nm	Visible and Near Infrared (VNIR)
B7	20 m <td 783 nm	Visible and Near Infrared (VNIR)	
B8	10 m	842 nm	Visible and Near Infrared (VNIR)
B8a	20 m	865 nm	Visible and Near Infrared (VNIR)

Las bandas para construcción de los principales índices de vegetación se centran en la B2, B3, B9 y B8, por lo que se puede obtener una resolución espacial de 10 m para la mayoría de los índices.



Figura 64. Ejemplo de visualización en la plataforma LAYERS de una parcela vista con imagen de satélite (10 m de resolución).

La combinación de ambas plataformas (drones y satélites) permitiría una mayor capacidad para discriminar longitudes de onda vecinas del espectro, sin rechazar a la alta resolución espacial.

En la siguiente ilustración se muestra de manera gráfica un esquema de combinación de imágenes de satélite con vuelos drone.

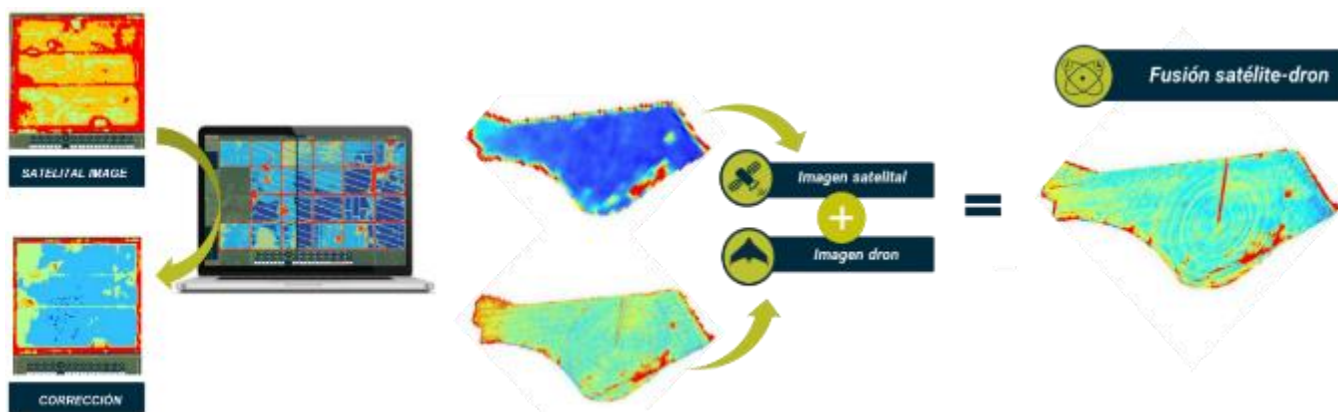


Figura 65. Representación gráfica de calibración imágenes de satélite con imagen dron.

6.5.3. Índices de vegetación de interés.

La información recogida mediante sensores se puede utilizar para la evaluación del estado del cultivo. Se ha visto que las plantas sanas, las estresadas o aquellas que tienen deficiencias nutricionales, presentan firmas espectrales particulares, que permiten la detección de los diversos efectos fisiológicos y bioquímicos evaluados, por ejemplo, mediante el uso de índices vegetativos [53]. Los índices de vegetación son valores obtenidos mediante fórmulas que combinan longitudes de onda relacionadas con los problemas concretos que se desean encontrar, por ejemplo, asociados a determinados compuestos bioquímicos (antocianinas, clorofila, etc.) o relacionados con la humedad, la evapotranspiración o el contenido en agua. Se diseñan para maximizar la sensibilidad a las características espectrales de la vegetación y minimizar los factores de confusión, como la reflectancia de fondo del suelo, los efectos direccionales o los atmosféricos.

Dependiendo de la información que se pretende obtener se utilizan longitudes de onda del visible, del infrarrojo cercano o de una zona denominada borde rojo, que es una zona de cambio brusco de reflectancia entre el rojo y el infrarrojo, que se ha relacionado con la concentración de clorofila y, por lo tanto, con la actividad fotosintética de las plantas. Por ello, tratan de maximizar las diferencias entre las características buscadas en las plantas, derivadas de problemas de estrés, nutricionales y/o relacionados con el riego.

Algunos de los índices más utilizados se describen a continuación.

El **Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada** (NDVI por sus siglas en inglés) es un indicador simple de biomasa fotosintéticamente activa o, en términos simples, un cálculo de la salud de la vegetación. El NDVI ayuda a diferenciar la vegetación de otros tipos de cobertura del suelo (artificial) y determinar su estado general. También permite definir y visualizar áreas con vegetación en el mapa, así como detectar cambios anormales en el proceso de crecimiento. Se calcula con la siguiente expresión:

$$NDVI = (800 \text{ nm} - 670 \text{ nm}) / (800 \text{ nm} + 670 \text{ nm}).$$

Funciona comparando matemáticamente la cantidad de luz roja visible absorbida y la luz infrarroja cercana reflejada. Esto sucede ya que el pigmento de clorofila en una planta sana absorbe la mayor parte de la luz roja visible, mientras que la estructura celular de una planta refleja la mayor parte de la luz infrarroja cercana. Esto

significa que una alta actividad fotosintética, comúnmente asociada con vegetación densa, tendrá menos reflectancia en la banda roja y mayor reflectancia en el infrarrojo cercano.

Los resultados del cálculo del NDVI varían de -1 a 1. El dosel de vegetación sano y denso debería estar por encima de 0,5, y la vegetación dispersa probablemente caerá dentro de 0,2 a 0,5. Sin embargo, es solo una regla general y siempre debe tener en cuenta la temporada, el tipo de planta y las peculiaridades regionales para saber exactamente qué significan los valores de NDVI.

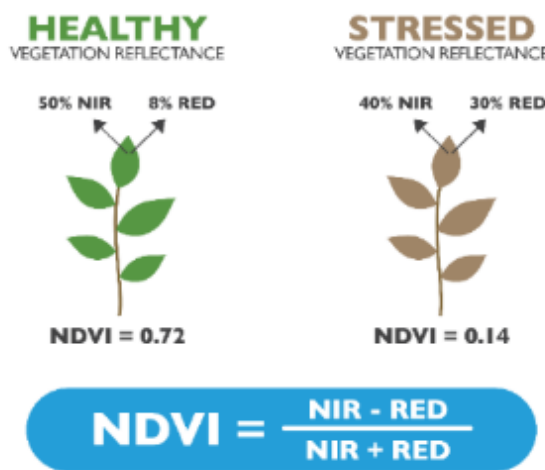


Figura 66. Fórmula NDVI.

Los resultados de NDVI se pueden representar gráficamente como un mapa de colores, donde cada color corresponde a un cierto valor dentro del rango que puede tomar el índice. No hay una paleta de colores estándar, pero usualmente se usa el «rojo-verde», lo que significa que los tintes rojo-naranja-amarillo indican suelo desnudo o vegetación muerta / escasa, y todos los tonos de verde son un signo de cubierta de vegetación normal a densa. Además, el N es un constituyente básico de la clorofila y de las enzimas del ciclo del carbono, por lo que juega un papel determinante en la fotosíntesis. Debido a la estrecha relación entre la capacidad fotosintética de las plantas y el contenido de clorofila este índice se puede utilizar para estimar la concentración de N (Figura 67).

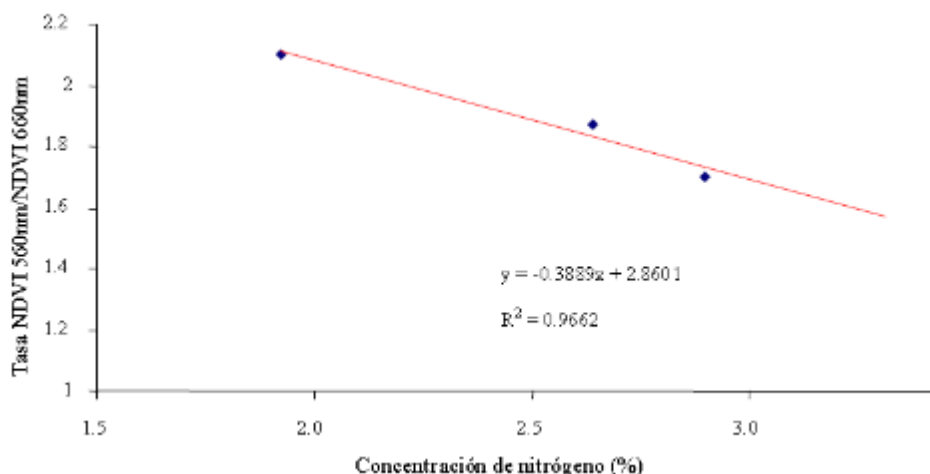


Figura 67. Relación entre la tasa NDVI y la concentración de nitrógeno.

El **índice de ratios de absorción clorofílica** (CARI por sus siglas en inglés) utiliza bandas correspondientes a la zona de mínima absorción de los pigmentos fotosintéticamente activos, correspondiente a los 550 nm (Verde) y 700 nm (Borde Rojo), en combinación con la zona de máxima absorción de clorofila, alrededor de los 670 nm (Rojo). CARI se diseñó para reducir la variabilidad de la radiación fotosintéticamente activa debida a la presencia de materiales no fotosintéticos. Se realizaron posteriores modificaciones al índice para compensar las variaciones de reflectancia debidas a los materiales de fondo (suelo y componentes no fotosintéticos) y para aumentar la sensibilidad a valores bajos de clorofila. Así, se crearon los índices CARI modificado (MCARI) y CARI transformado (TCARI).

En general, estos índices son sensibles a las características de reflectividad del suelo, por lo que resulta difícil de interpretar con valores bajos de Índice de Área Foliar (LAI). Por ello, se propuso su combinación con un índice de vegetación ajustado al suelo como es el Índice optimizado de vegetación ajustada al suelo (OSAVI por sus siglas en inglés). Este Índice ofrece muy buenos resultados en cultivos agrícolas, su combinación con el índice TCARI reduce la influencia de la reflectividad del suelo y realza la sensibilidad a las variaciones relacionadas con el contenido de clorofila. También es importante mencionar que la relación TCARI/OSAVI permite obtener datos de la variación del contenido clorofílico de la hoja. El dato de este índice es indicador del estrés nutricional y de situaciones de clorosis en la vegetación. Esta ratio TCARI/OSAVI, al estar relacionada con longitudes de onda de absorción de clorofila, también se ha utilizado ampliamente para estimar la concentración de N. Estos índices se calculan según las siguientes expresiones:

$$TCARI = 3[(700 \text{ nm} - 670 \text{ nm}) - 0,2 (700 \text{ nm} - 550 \text{ nm})] * (700 \text{ nm} / 670 \text{ nm})$$

$$MCARI = (700 \text{ nm} - 670 \text{ nm}) - 0,2 (700 \text{ nm} - 550 \text{ nm}) * (700 \text{ nm} / 670 \text{ nm})$$

$$OSAVI = [(1 + 0,16) (800 \text{ nm} - 670 \text{ nm})] / (800 \text{ nm} + 670 \text{ nm} + 0,16)$$

El **índice de reflectancia fotoquímica** (PRI por sus siglas en inglés) es una medida de la eficiencia de la planta para utilizar la radiación recibida y, por lo tanto, se utiliza principalmente como indicador del estrés hídrico y para la evaluación de la absorción de dióxido de carbono por las plantas. PRI Es sensible a las variaciones de los pigmentos carotenoides (por ejemplo, xantofila) en las hojas. Estos pigmentos carotenoides participan en

la conversión de la radiación fotosintética absorbida en carbono fijo. Como ejemplo de índice para determinar la concentración de un pigmento concreto, se puede mencionar el **índice de reflectancia de las antocianinas** (ARI, por sus siglas en inglés). La reflectancia de la antocianina es máxima alrededor de 550 nm. Sin embargo, la clorofila también refleja en una longitud de onda cercana. En este caso, para aislar las antocianinas, se resta la banda espectral de 700 nm, que refleja sólo la clorofila y no las antocianinas. El PRI y el ARI se calculan según las fórmulas:

$$PRI = (570 \text{ nm} - 530 \text{ nm}) / (570 \text{ nm} + 530 \text{ nm})$$

$$ARI = (1 / 550 \text{ nm}) - (1 / 700 \text{ nm})$$

Un índice diferente, por qué no dependen del espectro electromagnético sino de la temperatura, es el **Índice de Estrés Hídrico del Cultivo** (CWSI por sus siglas en inglés) es uno de los indicadores más utilizados para diagnosticar los déficits hídricos de los cultivos en función de la temperatura de las hojas. El CWSI se desarrolló como un indicador estandarizado para diagnosticar el estrés, superando los efectos adversos de otros factores ambientales que afectan la relación entre el estrés y la temperatura de la planta. El CWSI generalmente se determina mediante métodos empíricos basados en relacionar la diferencia de temperatura entre la hoja y el aire ($T_c - T_a$) con el déficit de presión de vapor de aire de una línea de base sin estrés hídrico. El CWSI se basa en la teoría del balance de energía en una superficie, las funciones lineales del diferencial de temperatura entre el cultivo y el aire y el déficit de presión de vapor, que dependen del cultivo y las condiciones atmosféricas. Para medir este índice, se suele usar imagen termográfica.

$$CWSI = (T_c - T_a) - (T_c - T_a)_{li} / (T_c - T_a)_{ls} - (T_c - T_a)_{li}$$

donde, T_c = temperatura del cultivo; T_a = temperatura del aire, el subíndice li (límite inferior) denota la diferencia entre las dos temperaturas cuando la evapotranspiración no está restringida por disponibilidad del agua y el subíndice ls (límite superior) denota la diferencia hipotética entre las dos temperaturas cuando la evapotranspiración es cero, como resultado de falta de disponibilidad de agua en el sistema suelo planta atmósfera.

Existen otros muchos índices, para ampliar conocimientos sobre ellos se puede consultar la revisión llevada a cabo por [54].

La información descrita anteriormente, junto con variables interrelacionadas como la tipología de suelo (Litologías) y los modelos digitales de superficie (MDS), nos permiten la adaptación de los sectores de riegos del cultivo y la determinación de planes de abonado específicos con un mejor ajuste de las diferentes dosificaciones, así como la obtención de información para un mayor control sobre el cultivo. Este ajuste de las dosificaciones, no solo repercute en la economía del agricultor, sino que tiene un importante valor añadido en contaminación de suelos y aguas subterráneas y superficiales.

6.5.4. Sistema de Información Geográfica.

Una vez que tenemos a nuestra disposición los datos, hay que ofrecerlos al agricultor de la forma más comprensible y útil posible. Para esto es útil contar con un sistema de información geográfica, que permita integrar, editar, analizar y mostrar la información geográficamente referenciada. Para ello se puede hacer uso

de los sistemas de información geográfica (SIG). Algunos de los más conocidos son QGis, ArcGis o SIGPAC. Estos sistemas permiten seleccionar las parcelas de interés, obtener los datos agronómicos relacionados y la información confeccionada, a partir de los datos obtenidos mediante teledetección.

A nivel visual, la información se puede ofrecer en capas temáticas superpuestas una encima de la otra. Así, por ejemplo, se pueden visualizar la distribución en la parcela del estado hídrico, del estado vegetativo o de la concentración de determinados nutrientes.



Figura 68. Ejemplo de sistema de información geográfica con control de visibilidad de capas.

Una de las ventajas de los SIG es la posibilidad de recoger y consultar los datos de carácter geográfico y agronómico. Esto es clave para generar una información útil y que sirva para la toma de decisiones. La introducción de estos datos se realiza normalmente a través de formularios con los apartados correspondientes. Los datos que suelen recopilarse en este sentido son:

- Provincia, Municipio, Polígono, Parcela, Subparcela/Recinto.
- Cultivo, Variedad, Patrón.
- Fecha de plantación, Fecha de recolección, Fechas fenológicas.
- Marco de plantación.
- Diámetro de copa.
- Textura del suelo.
- Conductividad eléctrica del agua y suelo.
- Tipo de riego, número de goteros por planta, caudal del gotero, uniformidad de riego.
- Plan de fertirrigación.
- Producción y rendimientos.
- Histórico de plagas y enfermedades.
- Histórico de tratamientos fitosanitarios.

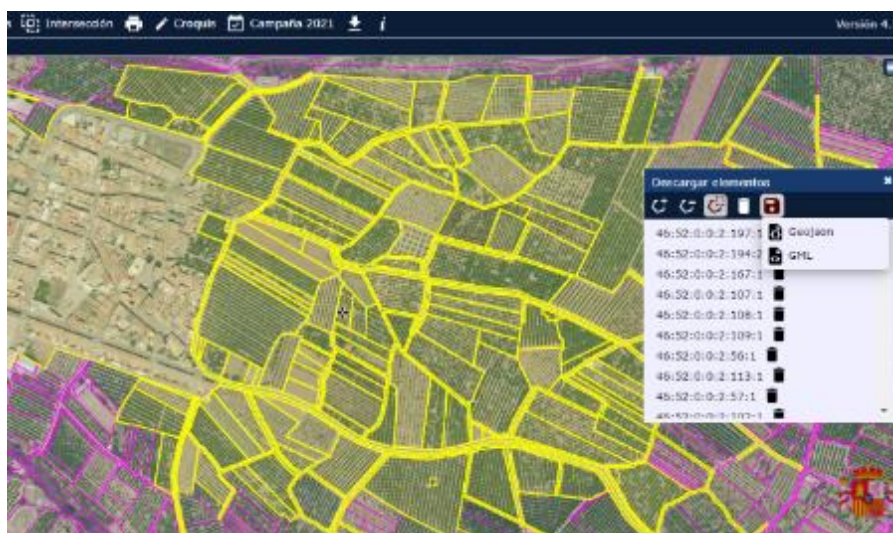


Figura 69. Descarga de recintos SIGPAC a través de sus herramientas.



Figura 70. Detalle de formulario de introducción de datos.

6.6. Red de riego y automatización.

Por medio de estructuras de riego comunitarias a presión, se consigue mejorar la captación y la distribución del agua, tanto desde el punto de vista de la eficiencia hídrica como energética. Por otro lado, la fertirrigación comunitaria bien gestionada, conlleva ahorros en mano de obra y fertilizantes, además de permitir un buen control de los nutrientes. Es difícil entender la aplicación de AP en un sistema de riego a presión sin que el sistema esté dotado de una serie de elementos que requieren atención particular.

6.6.1. Sistemas de bombeo.

Como se ha comentado con anterioridad la morfología, estructura y operación en las redes de riego es muy variada, sin embargo, al tratarse de sistemas “a presión” va a resultar común la presencia de elementos de bombeo. Son pocas las redes que cuentan con la ventaja de tener el punto de suministro desde una balsa o depósito, a cota suficientemente elevada, que ya garantice la presión en una distribución “por gravedad”. Bien desde la captación de un sondeo a una balsa de cabecera, por medio de un grupo buzo, o con la reimpulsión

tras una captación superficial o una balsa, aparecerán bombas para presurizar la red. Recordamos que esta presurización será necesaria tanto para el transporte, como para el correcto funcionamiento de los goteros o emisores de riego. Los rodetes de las bombas requieren el accionamiento del eje por medio de un motor eléctrico, que va a necesitar un suministro de energía. Hoy día, a pesar del crecimiento de los suministros fotovoltaicos, el aporte principal sigue siendo eléctrico convencional. En los costes anuales de una red de riego a presión, el coste principal se asocia a este suministro eléctrico.

La bomba y el motor eléctrico que configuran el grupo de impulsión, como cualquier otra máquina, no pueden transformar en potencia útil hidráulica toda la potencia eléctrica que están absorbiendo, apareciendo un rendimiento que relaciona estas potencias. Este rendimiento, por otro lado, no es constante; como se observa en la Figura 71, para una bomba, existe un caudal para el que se alcanza el rendimiento máximo, lo que supone el mejor aprovechamiento de la energía eléctrica absorbida.

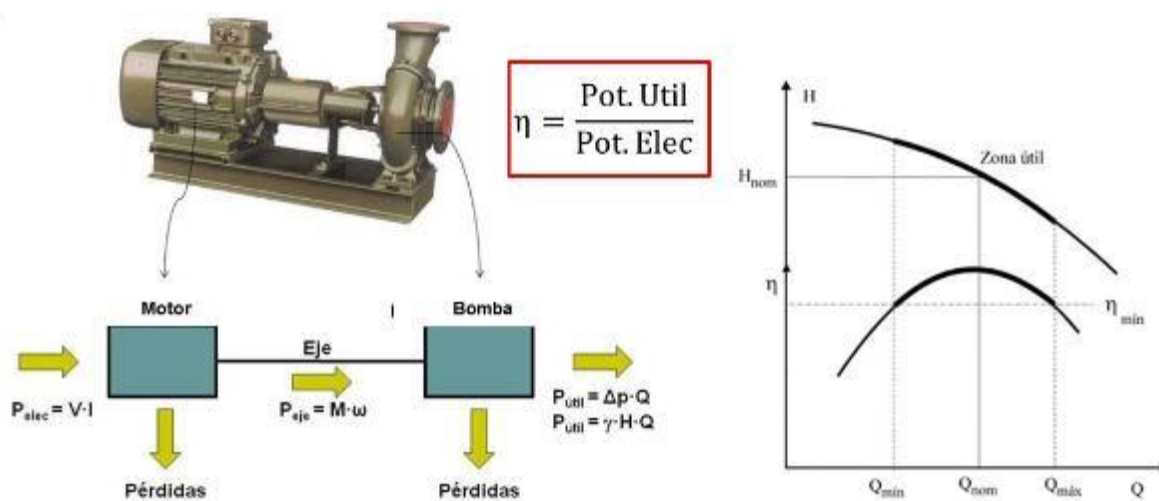


Figura 71. Balance energético en un grupo moto-bomba (izda.). Curvas Altrua-Caudal ($H-Q$) y rendimiento-Caudal ($\eta-Q$) de una bomba (dcha.).

Tanto en el diseño de la red de distribución, como en su posterior gestión, los puntos de funcionamiento reales deben situarse lo más próximos posibles a los rendimientos máximos y en cualquier caso en lo que se conoce como zona útil de la bomba, que está definida por aquella donde los rendimientos se sitúan próximos al máximo.

Si se sigue una gestión convencional, pero aún más si ha de aplicarse un riego de precisión, la red tendrá que adaptarse a distintos puntos de funcionamiento y debe existir suficiente capacidad de regulación en el sistema de bombeo. Para lograr una buena capacidad de regulación, existen soluciones técnicas que permiten mantener siempre elevados los rendimientos; pasan por que exista la posibilidad de acoplar bombas en paralelo y la operación de variadores de frecuencia. Estos últimos elementos pueden adaptar y desplazar (dentro de unos límites) las curvas de las bombas. La automatización de la regulación se consigue mediante la inclusión del bombeo en los programadores de riego, con la correspondiente integración en el programador de señales procedentes de sensores de presión o caudalímetros.

6.6.2. Hidrantes y electroválvulas.

Los hidrantes son las derivaciones desde la red de distribución hasta cada parcela. Como ya se ha comentado, en ellos pueden estar agrupadas varias tomas a parcela o pueden ser monousuario. Desde un punto de vista funcional, su misión siempre consistirá en la de apertura y cierre y medición de caudal, pero también puede incorporar funciones de limitación de caudal y regulación. Para ello, se integrarán bajo una misma caseta o arqueta, válvulas de paso, hidráulicas de regulación, electroválvulas, contadores, manómetros, ventosas, filtros y todos aquellos elementos hidráulicos o de automatización requeridos para que cumpla su función de garantizar el caudal y la presión requerida en parcela.

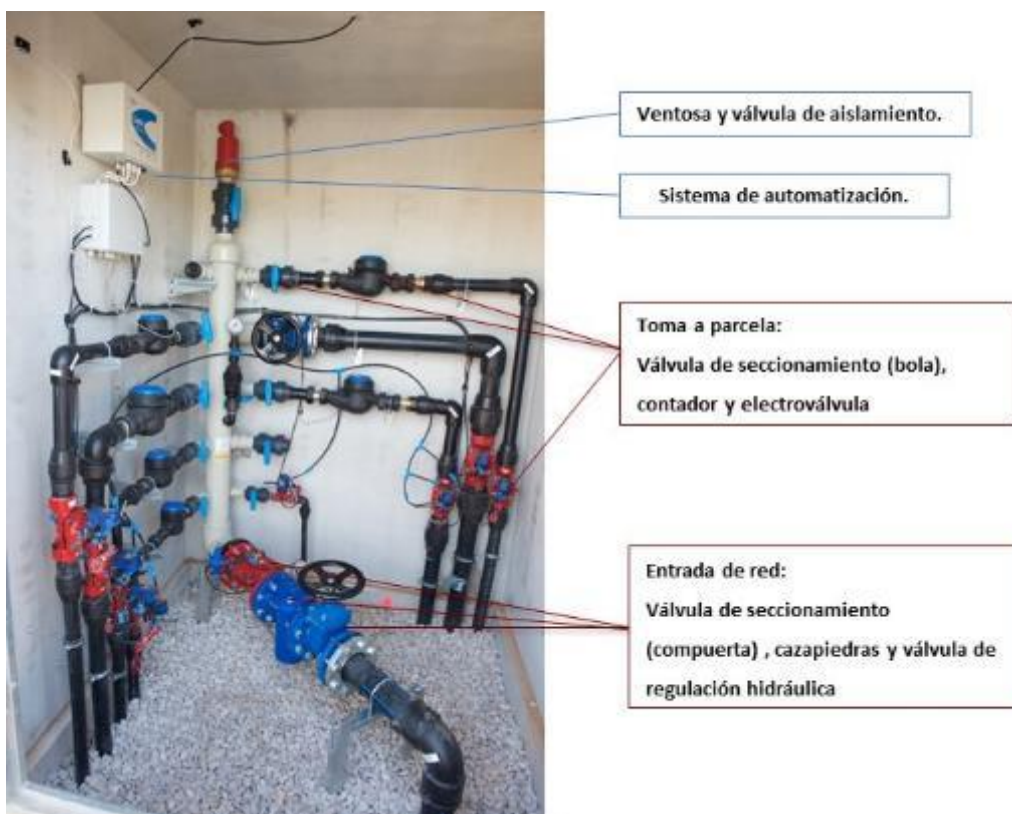


Figura 72. Ejemplo de hidrante multiusuario.

De entre todos los elementos, las electroválvulas constituyen la pieza clave de la automatización del sistema; en su configuración habitual se trata de una válvula de membrana o pistón sobre la que acciona un solenoide eléctrico. El solenoide es el dispositivo que recibe la señal de apertura o cierre, de tipo eléctrico, desde el sistema de automatización. El hidrante, por tanto, incorporará las unidades de campo del sistema de telegestión encargados de emitir las señales de control de tiempos de riego o recibirlas desde los contadores o sensores de presión.

6.6.3. Equipos de inyección de fertilizante.

El aporte de fertilizante u otros productos químicos (fertirrigación o quimigación en su concepción más amplia) en el agua de riego admite diferentes configuraciones. Los componentes fundamentales serán depósitos (frecuentemente plásticos o de fibra de vidrio), agitadores o soplantes para mantener la dilución, pequeños filtros de mallas, válvulas de seccionamiento y electroválvulas (resistentes al ácido) e inyectores. La función

de las electroválvulas vuelve a cobrar sentido en sistemas donde los tiempos de inyección estén automatizados y controlados por algún tipo de programador. Entre las tecnologías usadas en la inyección, en cabezales, se pueden encontrar tubos Venturi, dosificadoras proporcionales con accionamiento hidráulico o inyectoras eléctricas. Estas últimas pueden ser de tipo volumétrico (habitualmente de pistón o diafragma) o pequeñas bombas centrífugas para realizar una inyección proporcional al caudal de riego. Todos estos inyectores son susceptibles de automatizarse, pero requieren una buena calibración y opciones de regular los flujos de inyección.



Figura 73. Tipos de inyectores de fertilizante en cabezales de riego [55].

La forma de ejecutar la infraestructura necesaria y gestionar la fertirrigación es variada y dependerá mucho del grado de automatización y gestión de la red. Si la red funciona a la demanda el caudal de fertilizante inyectado se debe realizar continuo y proporcional al caudal que transporta la red principal. Bajo esta situación, el equipo inyector debe estar compuesto por inyectoras eléctricas, preferiblemente de tipo centrífugo, donde el caudal de solución se ajustará modificando la velocidad de giro de la bomba. Para ello será necesario el empleo de un variador de frecuencia para el motor de la bomba, actuando bajo el emisor de pulsos del contador o el caudalímetro electrónico, situado en la tubería principal de la red de distribución. Si este es el esquema de operación, no se requieren electroválvulas en las distintas tomas de parcela puesto que es el usuario final quien realiza la operación de apertura/cierre.

Si la red distribuye el agua en sectores o turnos fijos (organización rígida) y cada parcela tiene un mismo tiempo de riego (determinado por los gestores de la red), la inyección colectiva se puede programar de una forma más racional y fraccionada, repartiendo los tiempos de limpieza y de aplicación de cada fertilizante. Sin embargo, como ya se indicó anteriormente, se precisa un grado de automatización mucho mayor, siendo necesario dotar con una electroválvula (al menos) todos los hidrantes multiusuario. Se amplían entonces los tipos de inyectores que se pueden utilizar; aunque para redes comunitarias siempre son más interesantes las inyectoras eléctricas, dando buen resultado aquí las bombas de pistón.

Se muestra un ejemplo particular en la siguiente figura, donde se puede observar un sistema de inyección de fertilizantes para 6 sectores de riego (tuberías paralelas horizontales). Cada uno de estos sectores cuenta con un contador volumétrico independiente y una entrada de fertilizante diferente. Cada una de estas entradas de fertilizante recibe solución desde su respectiva batería de inyectores Venturi. A su vez, cada una de estas agrupaciones está formada por cuatro inyectores, con sus correspondientes electroválvulas y contadores

volumétricos independientes, por último, la línea de aspiración procedente de sus respectivos tanques de fertilizante.



Figura 74. Ejemplo de sistema de inyección mediante Venturi en red sectorizada

6.6.4. Programadores y sistemas de telegestión.

El sistema de automatización, entendido como el sistema y elementos computarizados para controlar equipos y procesos, en una red de riego, puede ser solo de telemedida (p.e. recogida de volúmenes de contadores), telemando (donde además se actúa a distancia sobre electroválvulas) o telegestión (incluye las dos funciones anteriores más la planificación y el control automático, tras el procesado de la información recibida. Queda implícito que estas operaciones tienen que hacerse a distancia, requiriéndose un sistema de transmisión de la información mediante técnicas de telecomunicaciones.

El sistema de automatización puede responder a distintos objetivos, desde aquellos sistemas que sólo controlan algunas funciones de limpieza de filtros en el cabezal o se limitan a la lectura automática de contadores, hasta los sistemas SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition, Supervisión, Control y Adquisición de Datos) que telegestionan integralmente la explotación. Estos últimos son capaces, en tiempo real, de registrar todas las variables hidráulicas del sistema, admiten la información de sensores, estaciones climáticas, etc. Por otro lado, permiten controlar la apertura y cierre de electroválvulas, arranque de bombas, nivel de depósitos, etc.

El siguiente paso lo constituyen los sistemas de soporte a la toma de decisiones o DSS por sus siglas en inglés (Decision Support System). En una definición sencilla, se puede decir que trata de programas informáticos que implementan herramientas o modelos para recopilar información útil para identificar problemas y ayudar en la toma de decisiones para la resolución de esos problemas. La información puede registrarse manualmente por la observación y conocimiento del usuario o automáticamente desde todo tipo de sensores, para ser utilizada en los modelos de simulación que además pueden ser corregidos en tiempo real. Se pueden utilizar para realizar recomendaciones de riego y optimizar el manejo de este, para la fertilización y el manejo de nutrientes o para la prevención de plagas y enfermedades. Existen tanto DSS genéricos como otros desarrollados para cultivos específicos en condiciones particulares.

Por último, se pueden encontrar plataformas digitales para la gestión agrícola, donde se integran sistemas SCADA, DSS, y bases de datos en Sistemas de Información Geográfica (SIG). Los gestores o técnicos de la red de riego, pero también los usuarios finales tienen la posibilidad de acceder a la información de su explotación y (según los niveles de gestión definidos) actuar sobre los distintos elementos.

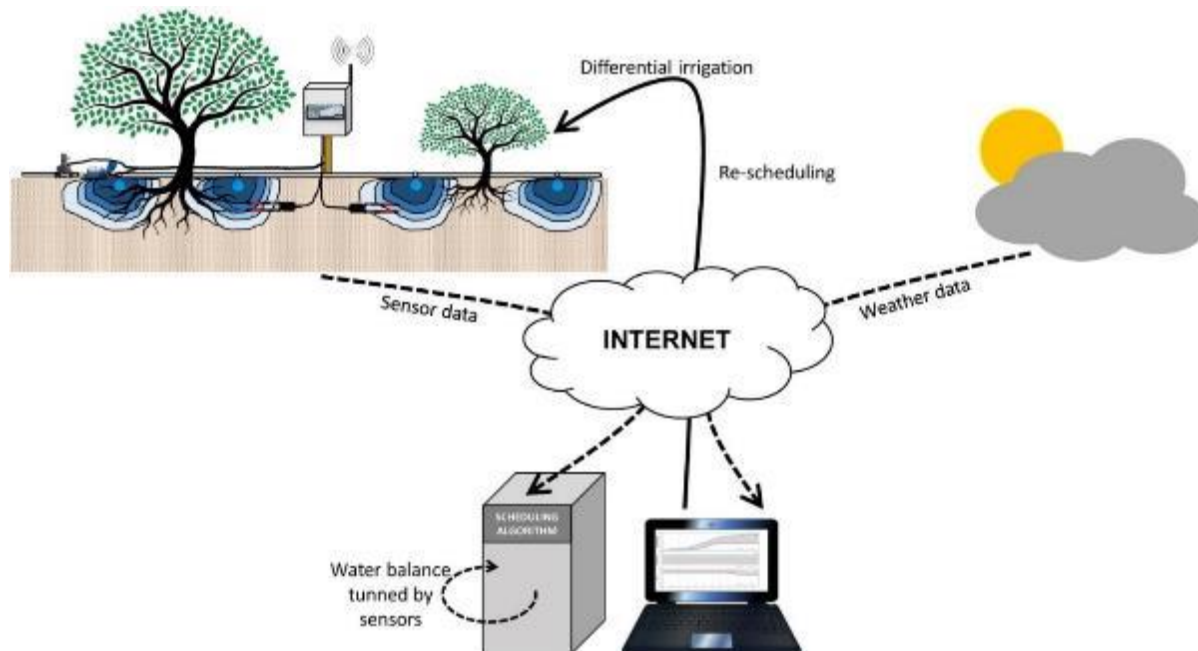


Figura 75. Esquema de sistema de telegestión de riego [56].

Los componentes físicos y el software, por tanto, pueden ser muy diferentes. Comenzando por simples electroválvulas comandadas por un temporizador; pasando por programadores con un número limitado de salidas y entradas independientes; hasta llegar a complejas estructuras informáticas con comunicación WIFI desde el campo a teléfonos móviles, que actúan sobre cualquier elemento físico susceptible de emitir o recibir una señal eléctrica.

6.6.5. Modelo informático.

Puesto que el fertilizante necesita un tiempo de viaje desde el punto de inyección hasta los puntos de consumo, la programación del riego debe organizarse de tal manera que el fertilizante alcance las tomas según el requerimiento de los cultivos.

Dada la complejidad topológica de una red y las variantes en su gestión, la utilización de un modelo hidráulico calibrado que modelice fielmente la distribución del fertilizante a través de la red es de gran ayuda. El primer paso para su elaboración consiste en caracterizar e identificar correctamente los elementos de la red. Los Sistemas de Información Geográfica permiten almacenar esta información espacial con la que posteriormente construir el modelo matemático de la red. El software más utilizado de simulación es EPANET [57], que permite realizar simulaciones hidráulicas y de calidad y utilizar su "Toolkit" desde la mayoría de entornos de programación.

Existen aplicaciones que facilitan la construcción de los modelos hidráulicos en el entorno de EPANET a partir de los SIG. Alguno de ellos son QGISRED (<https://github.com/neslrel/QGISRed>), GISWATER

[\(http://www.giswater.org/\)](http://www.giswater.org/) QWATER (<http://www.mikebydhi.com/>), WaterCad y WaterGems (www.bentley.com).

Una vez construido el modelo y definido el funcionamiento de los componentes, este debe ser calibrado para reproducir fielmente el comportamiento de la red. Los parámetros ajustables del modelo fundamentalmente comprenden los coeficientes de rugosidad y los diámetros de las tuberías cuando están muy deterioradas, así como los consumos de los nudos cuando son desconocidos.

Con un modelo bien calibrado, no solo se pueden simular y testar la validez de los tiempos de fertirrigación, sino que también pueden ensayarse diferentes escenarios de riego (reales o futuros) con agrupaciones variables de hidrantes o tomas. Estos análisis determinarán la capacidad de la red y el sistema de bombeo para suministrar agua a las tomas con el caudal requerido y presión suficiente, contratando los rendimientos y los consumos energéticos.

El uso cada vez más generalizado de SCADA en la gestión de las redes de riego permite la adquisición de los datos necesarios de consumos y presiones para mantener actualizado el sistema en casi tiempo real y reproducir el comportamiento de la red simulando las programaciones de riego establecidas [58] . La combinación de modelos y sistemas SCADA definen la herramienta final con la que debe dotarse una red de distribución para poder realizar riego y fertirriego de precisión.

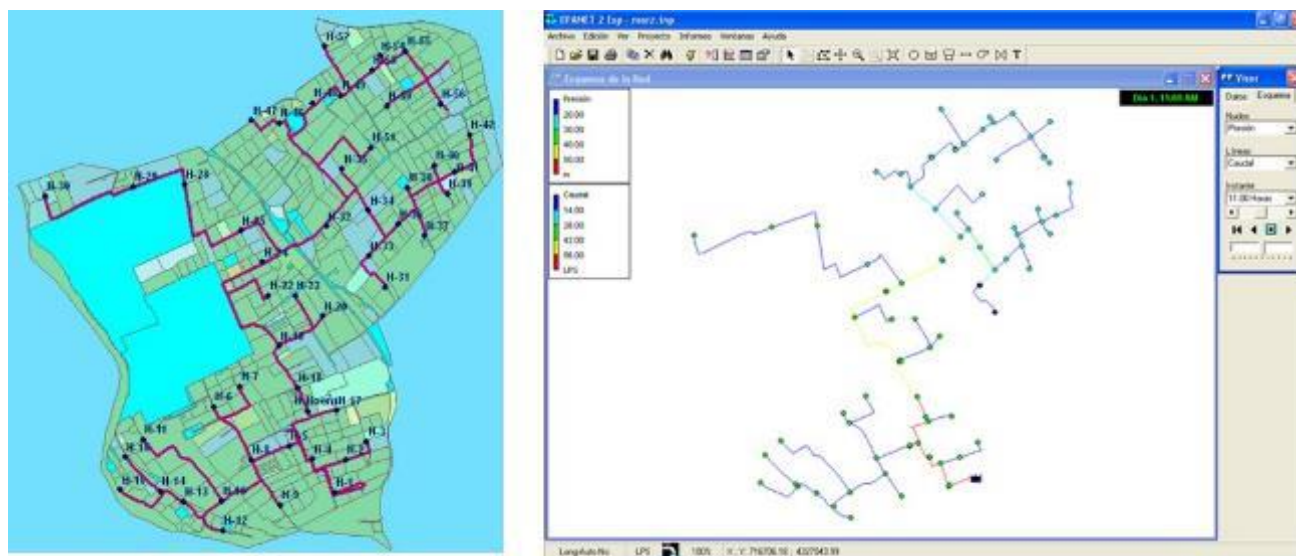


Figura 76. Parcelario en formato SIG y modelo de la red.

6.6.6. Condicionantes en el transporte y distribución de fertilizantes.

La fertirrigación comunitaria está bien justificada cuando existen monocultivos mayoritarios con necesidades de abonado homogéneas y el tamaño medio de la explotación de cada propietario/usuario de la comunidad es pequeño, siendo paradigmática la Comunidad Valenciana donde tradicionalmente el tamaño medio de parcela es muy pequeño (menos de 1 ha) y el monocultivo de cítricos es dominante [59].

Sin embargo, la introducción de cultivos diferentes a los cítricos en los sectores de riego o dar un tratamiento particularizado a las distintas variedades, fuera del esquema de monocultivo, implica variaciones en la dosis

para las parcelas. Otro cambio importante aparece cuando muchas de las parcelas optan por el cultivo ecológico, lo que requiere el lavado de la red de las sustancias que no sean compatibles [60]. Bajo estos nuevos condicionantes, las opciones de sistemas de riego a la demanda dejan de ser viables para conseguir un correcto reparto de fertilizante, siendo casi obligatorio que el control de los tiempos de riego y fertirriego quede completamente organizado por los gestores de la red y no por los usuarios finales.

El comportamiento de la red de distribución de agua y la evolución del fertilizante hasta cada hidrante ha sido estudiado [61], analizando cómo la programación de riegos condiciona el tiempo de aplicación de fertilizante en cada parcela. Así, una conclusión interesante de este modelo es que si existen hidrantes/parcelas que no quieren fertirrigación comunitaria es difícil garantizar que no les llegue ninguna cantidad de producto químico, manteniéndose el tiempo de fertilización correcto. Se puede establecer una metodología, por medio de un modelo de EPANET, que homogenice los tiempos de riego si hay usuarios que no desean fertirrigación. Del mismo modo, y si la red es energéticamente dependiente para presurizarse, se pueden definir estrategias para garantizar distintos tiempos de fertirrigación. En el caso de que la red dependa de la aportación de energía habrá que compatibilizar los objetivos de la eficiencia de la distribución del fertilizante con el consumo energético de los grupos de bombeo, puesto que el punto de funcionamiento óptimo energético no tiene por qué ser el mismo que garantiza la óptima distribución del fertilizante.

El empleo de modelos también permite diseñar una metodología para limpiar la red de fertilizante o hacerlo llegar a todos los puntos de consumo en el menor tiempo posible y minimizando los volúmenes empleados [62].

Se pueden definir otras medidas complementarias a este manejo de la sectorización y regulación hidráulica de la red. Estas incluyen monitorización por medio de sensores de CE y pH en el cabezal, antes y después de la inyección y en los hidrantes críticos de la red, para vigilar y comprobar la dosificación adecuada del fertilizante. Además, y para la inyección de productos de alto valor añadido y pequeñas concentraciones es necesario diseñar además de los cabezales principales, hidrantes de inyección de productos en puntos estratégicos de la red para reducir los tiempos de recorrido y optimizar la aplicación de los productos [60].

7. Implementación práctica sobre “sociedad de riego tipo-GOCitricos”.

En el presente capítulo se desarrolla, de forma sucinta, los pasos, basados en la experiencia, que son necesarios para avanzar en la implementación de la Agricultura de Precisión, en relación al riego y a la fertilización.

7.1. Inicio de los trabajos. Condicionamientos previos.

El primer paso es conocer dónde vamos a trabajar. En el ámbito de las sociedades de riego hay una gran variabilidad de organizaciones, en función de las tipologías de cultivo, la época histórica de implantación del regadío en la zona, de la causa de su creación, de la distribución de la propiedad, del tamaño de la zona regable, del origen del agua (superficial o por captación de acuíferos profundos), de su reconocimiento administrativo... Esto deriva en una variación de ventajas y dificultades a la hora de implementar los trabajos, aun así, para el éxito de la implantación de la Agricultura de Precisión, lo importante es que en la Sociedad de riego:

- Haya implicación de la Junta de Gobierno, y autorización de las actuaciones en sus infraestructuras.
- Se tenga confianza en el trabajo a desarrollar por los técnicos, propios y externos.
- Se trabaje con transparencia y se ponga a disposición la documentación que sea requerida, ya sea en relación a las infraestructuras, las parcelas, o en el uso del agua y de los nutrientes.
- Que se cumpla con la regulación en protección de datos.
- Que se tenga un equipo técnico que utilice adecuadamente las tecnologías que se implantan en su zona de riego, que conozca los cultivos, que sepa interpretar los resultados obtenidos, y coordinar la aplicación de las soluciones que se han decidido.
- En su defecto, se deberá acudir a un consultor o empresa externa que asesore sobre el proceso a seguir, ayude en la interpretación de la información que se obtiene en riego y en fertilización y en la consiguiente toma de decisiones.
- Que se cuente con unas instalaciones que permitan la aplicación diferenciada del riego y fertilización por parcela y cultivo.
- Que se cuente con un equipo técnico que realice el mantenimiento de las instalaciones y que las utilice aplicando lo que se ha decidido, de forma semanal, o diaria según el caso.
- Que haya disposición a adecuar las instalaciones para mejorar su eficiencia de uso y poder aplicar en campo a tiempo real y de forma adecuada, y según cultivo, las decisiones que toma el equipo técnico.
- Que se produzca una evaluación anual de los resultados y rendimientos obtenidos, tanto comunitario como en parcelas de seguimiento.

Antes de realizar los trabajos se debe establecer un acuerdo general entre la sociedad de riegos, los técnicos de la misma que vayan a estar implicados en el proceso, los técnicos externos que asesoren, en su caso, sobre la implantación de la nueva tecnología y hagan seguimiento de los resultados, y la empresa proveedora de la información vía satélite y/o dron, y que facilite la lectura de los datos en plataforma.

7.2. Evaluación hidráulica y energética, y adecuación de las instalaciones.

La base fundamental de la Agricultura de Precisión es la obtención de los mejores resultados en la explotación, actualmente valorados en cantidad y calidad de fruto, con la mejor utilización de los insumos, en este caso el agua y los fertilizantes aplicados vía riego localizado, y de la energía utilizada en su aplicación.

Al mismo tiempo, como se indica previamente, una de las bases de esta tecnología es que las recomendaciones de actuación en tiempo real que se tomen sobre las parcelas de riego, puedan ser ejecutadas completamente por la sociedad de riego. Para que esto sea posible, la infraestructura de las sociedades han de permitir la aplicación diferenciada del abono y del riego por parcelas, o al menos la sectorización agrupada por necesidades de los cultivos, que normalmente viene definida por el tipo de cultivar, patrón, edad, y las condiciones agronómicas de la parcela.

Lo primero que se ha de hacer es una evaluación hidráulica y energética de las instalaciones que, de forma directa, permitirá, si se siguen sus conclusiones, mejorar el funcionamiento hidráulico de la red y una reducción de costes energéticos, y de forma indirecta permitirá la adecuada implantación de la metodología de Agricultura de Precisión.

Por lo que los puntos fundamentales para su aplicación son:

- Cabezal de riego:
 - Grupo de bombeo de distribución con curva de funcionamiento de caudal/presión ajustada a la demanda de los posibles sectores de riego de la instalación, así como variador de frecuencia que permita su mayor eficiencia de funcionamiento. En el caso de que exista una diferenciación entre un grupo de bombeo para captación y otro para distribución, los dos han de tener la curva ajustada a las necesidades, y han de estar bien sincronizadas, incluyendo la posible existencia de una balsa de regulación.
 - Equipo de Fertilización: para un abonado diferenciado en una sociedad de riego se requiere que haya por lo menos 4 depósitos de abonado, uno para el compuesto que aporta Nitrógeno, otro para el que aporta Potasio, otro para el que aporta el Fósforo y otro para la mezcla de microelementos y otros productos de aplicación vía radicular. Al mismo tiempo ha de tener un sistema de inyección diferenciada en la red de la cantidad de producto proveniente de cada cuba para cada sector. De esta forma en cada sector se podrá diferenciar el caldo que se aplica y se puede aplicar la cantidad deseada.
 - Modelado de la aplicación. Se ha de tener en cuenta si la instalación se vacía o se mantiene en carga después del riego, especialmente para este segundo caso se requiere que haya un modelo que defina los tiempos de aplicación de cada uno de los productos, para evitar que en algunas parcelas haya solape entre lo que se aplica en unos sectores con lo programado para ellas.
 - Programador de riego y fertilización, que controle el caudal que se gasta de cada cuba de fertilizante, y que se aplica en cada sector, así como el caudal de agua que sale del cabezal. De esta forma se puede aplicar de forma diferenciada el abonado por sector, y se sabe exactamente las cantidades que se emplean, y cuando se emplean.
- Red de riego.
 - Funcionamiento adecuado de la red en presiones y caudales, según las dotaciones de agua aprobadas por la sociedad de riego, y derivadas de la dotación definida por la Confederación Hidrográfica.
 - Comando independiente de cada unidad de riego. Cada parcela ha de estar dotada de electroválvula propia de forma que pueda agruparse en un sector u otro en función de las necesidades de riego, y así pueda aplicarse una fertirrigación diferenciada.

Siendo también deseable:

- Cabezal de riego.
 - Instalación de captación de energía renovable. Esto permite la aplicación del riego y de los nutrientes durante el día, en momentos en los que la planta les da un mejor uso, y por tanto aumentando la eficiencia de su utilización. También permite salir de las horas valle de riego, y aumentar por tanto el tiempo de riego de la sociedad. De esta forma aumenta también el número de sectores que se pueden programar en una sociedad de riego, y por tanto las posibilidades de adecuación del riego y abonado en cada uno de ellos.
 - Programador comandado de forma remota. Esto permite que no sea necesario acudir al cabezal para programar el riego y facilita que, en caso de comunidades muy extensas, aunque tengan técnicos propios, no tengan que acudir a cada uno de los cabezales para programar la fertirrigación semanalmente, y en el caso de sociedades pequeñas, que no tengan técnico propio a tiempo completo, el consultor externo pueda atender la fertirrigación de forma continua, y hacer cambios, sin necesidad de hacer el desplazamiento, y por tanto abaratando costes. Se mantiene, para cuando sea necesario, la posibilidad de comando de las órdenes desde el cabezal.
 - Sensores para el control del pH y de la conductividad eléctrica, a la salida del agua del cabezal. Esto permite un seguimiento de la fertirrigación además de controlar estos parámetros en casos de sectores en los que los cultivos sean sensibles a ellos.

7.3. Instalación de la sensorización terrestre y aérea.

Para hacer una buena monitorización de lo que ocurre en las plantas es necesario la instalación de sensores. Estos pueden ser aéreos, como cámaras multispectrales o hiperespectrales, o térmicas, instaladas en vehículos autónomos no tripulados, conocidos por su acrónimo como UAVs o popularmente como drones, o instaladas en satélites, o pueden ser terrestres, como las sondas de capacitancia. Al mismo tiempo, se requiere que haya una plataforma web que agrupe la información captada y permita su análisis y gestión en remoto.

- Plataforma web.
 - Para que se pueda aprovechar adecuadamente la información, se ha de incluir también en la plataforma web los datos agronómicos del cultivo, sociales, de instalación hidráulica y de fertilización y producción propia de cada una de las parcelas. Como se puede observar en la ficha utilizada en el proyecto, los datos que se requieren son:
 - Datos de socio.
 - Nombre y apellidos, teléfono y mail. Esto es necesario para que el técnico pueda contactar directamente con el socio, y ayudarlo a mejorar sus instalaciones según los datos obtenidos en la sensorización. También para

facilitarle acceso a la plataforma de forma que puedan hacer un seguimiento directo de la información que ésta provee.

- Autorización de uso de la información conforme a lo establecido en la ley de protección de datos.
- Datos de las parcelas:
 - Localización. Municipio, Polígono, Parcela, recinto.
 - Superficie.
 - Agronómicos. Cultivo, Variedad, Patrón. Fecha de cultivo. Marco de plantación. Cosecha de los dos últimos años.
 - Hidráulicos: tipo de riego (manta o presurizado), caudal de los goteros, número de laterales de riego, distancia entre goteros, dotación horaria por parcela.
 - Nutrición: además de la fertilización que aporta la sociedad, si el particular añade más productos, y en ese caso ¿qué productos añade?

COMUNIDAD DE REGANTES LA SENYERA			
Toma de Datos proyecto			
Grupo Operativo de Agricultura de Precisión de Riego y Fertilización de Cítricos			
Rogamos nos devuelva cumplimentada esta ficha aunque desconozca algún dato			
A.- SOCIO // ARRENDATARIO			
Nombre			DNI/CIF
Correo electrónico			Teléfono móvil
DATOS DE LAS PARCELAS RUSTICAS			
Referencia SIGPAC			
Municipio	Polígono	Parcela	Superficie (Hanegadas)
producción 2018 (@/kilos)		producción 2019 (@/kilos)	
cultivo	variedad	fecha plantación	marco plantación (6*4, 5*5, otros)
tipo de riego (goteo/manta)	caudal gotero (litros/hora)	numero laterales riego	distancia entre goteros (metros)
¿Añade más abono por su cuenta? * SI NO			
Tipo de abono (Producto y cantidad)			
<small>*Tipo de abonado diferente al de la Comunidad</small>			
Fdo. _____		El firmante autoriza a la Comunidad de Regantes La Senyera a ceder sus datos para el proyecto Grupo Operativo de Agricultura de Precisión de Riego y Fertilización de Cítricos	

Figura 77. Ficha de toma de datos para los miembros de una red comunitaria.

- Es fundamental la colaboración de la sociedad de riego para obtener la información de las parcelas de los comuneros y para gestionarlas adecuadamente cumpliendo la ley de protección de datos.
- Posteriormente se requiere que estos datos se introduzcan en la plataforma web por técnico competente y se valide la digitalización de las parcelas y estos datos por parte de la Sociedad de riego.
- Sensorización aérea.
 - Satélite: captación de datos cada varios días a partir de Sentinel 2, dentro del programa Copernicus. Establecer contrato para la provisión de estos datos en caso de que sea necesario.
 - UAVs (drones). Establecer un calendario de vuelos adecuado para la captación de información. La diferencia fundamental entre Satélite y Dron es la resolución de la imagen. En el primer caso, los píxeles dan información uniforme de marcos de 12 a 20 metros. En el caso de los drones está entre los 3 y 5cm de resolución pixel.

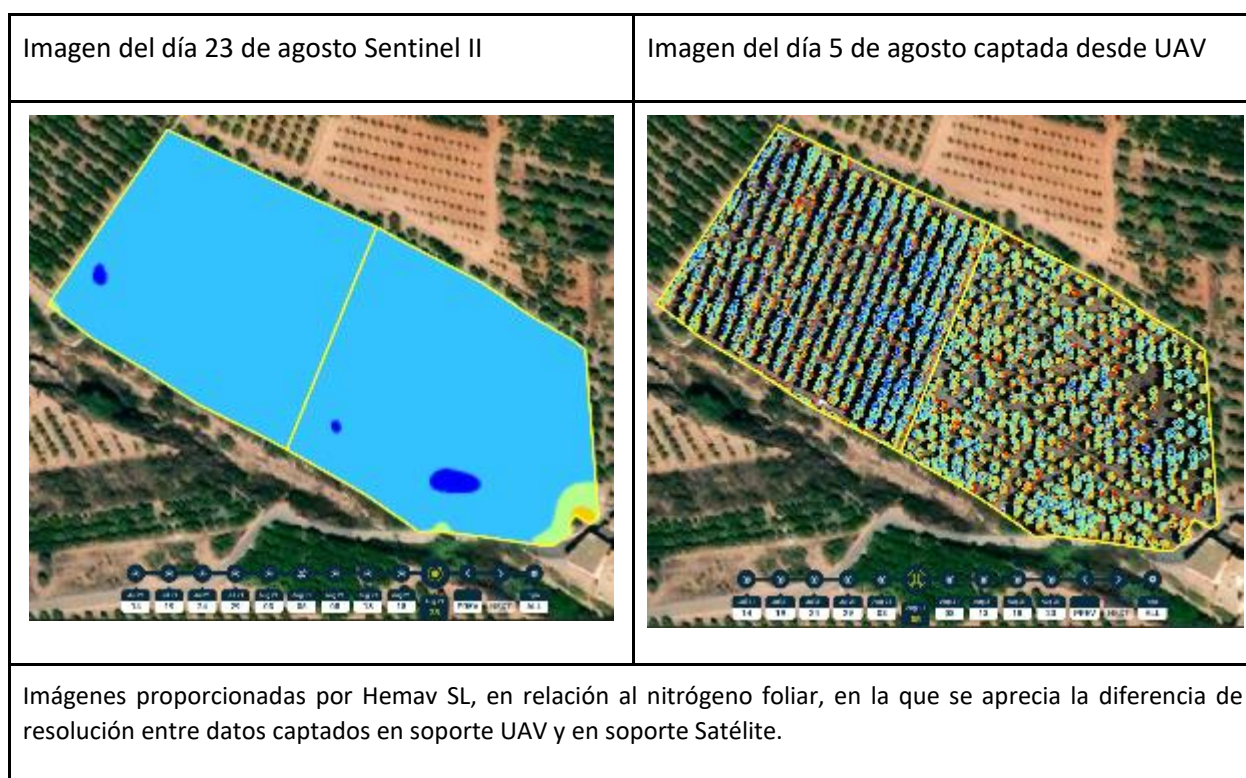


Figura 78. Comparación de Imágenes aéreas.

- Al mismo tiempo, para el desarrollo de estos vuelos se requiere de empresas especializada y certificada, y que tenga las cámaras adecuadas para incluir en las cargas de pago del dron. Normalmente suelen ser térmicas para el riego o multiespectrales ajustadas a unas longitudes de onda determinadas en el caso de nutrición.

- En el caso de uso de UAVs se requiere que la zona de trabajo no está afectada por un aeropuerto nacional o internacional, que impide completamente el uso de esta tecnología, o de aeródromos privados, que permiten el uso del UAV siempre que se avise previamente y se cumplan con los condicionamientos del mismo.
- Sensorización terrestre:
 - Caracterización de la zona de trabajo y de la diferente sectorización de la sociedad de riego. Las sondas de capacitancia trasladan la información del estado hídrico del suelo a diversos niveles de profundidad en la zona radicular de los bulbos definidos por el riego localizado. Según esta información se infiere el estado hídrico de la planta y así las posibles recomendaciones de riego. Según el tipo y edad de la planta, la estructura y textura del suelo, etc. se produce una variabilidad en el riego. Para captar esta variabilidad se hace un plan de zonificación de las sondas de capacitancia, y el número de ellas que se han de instalar.
 - Instalación de las sondas y seguimiento de las mismas. Esto incluye la disposición de la información en plataforma web móvil así como la introducción de tarjetas de datos a instalar en los Data Logger que acompaña a cada sonda, que comuniquen con el servidor la información captada.
 - Requiere por parte de la Sociedad de riego cuidar el material instalado en las parcelas y atender al seguimiento remoto de la información.

7.4. Seguimiento del riego, de la nutrición, de la situación sanitaria y de las labores culturales.

Una vez instalada la sensorización terrestre, puesta a punto la plataforma web en la que recoger los datos de la sensorización, contratada la información satélite y el plan de trabajo de captación de datos mediante UAVs, ya estamos en disposición de empezar a trabajar. Sin embargo, es necesario que exista un técnico o técnicos competentes que puedan incluir estos datos en su proceso de toma de decisiones, y ajustarlo a los planes de riego y fertilización anuales y semanales de las sociedades de riego, así como para intervenir en días determinados según las necesidades.

Se ha de entender, que, igual que un paciente va a un médico, que utiliza una tecnología y provee un diagnóstico y un tratamiento, la planta es atendida por un técnico que conoce la tecnología, que es capaz de hacer un diagnóstico, y recomendar un tratamiento. En ambos casos el auto-tratamiento es peligroso. Actualmente, también hay que considerar el desarrollo de la biotecnología que está poniendo en el mercado muchos productos comerciales de alto valor, y que compiten con otros de alto coste y sin valor contrastado. Es necesaria la figura técnico competente para ayudar a discernir en el proceso de toma de decisiones.

Antes de esto se requiere:

- Labores de cultivo. Que el técnico conozca qué se está haciendo a nivel de parcela para el desarrollo de los cultivos, de forma que la interpretación de los datos no se vea sesgada por abonados

particulares en parcela, o aplicación de hormonas o de productos fungicidas o de otros. El técnico no intervendrá en este proceso de toma de decisiones particular en parcela, pero sí que ha de estar informado de cara a evitar observar parcelas con resultados anómalos y que no se sepan explicar, para integrarlos en sus decisiones a nivel de sociedad.

- Riego. Conocer el plan de riego anual de la sociedad de riego que se ha venido aplicando en los años anteriores, así como el previsto para el presente año. A partir del mismo puede ir planificando o previendo modificaciones. Acceso a la red SIAR de estaciones agroclimatológicas y a la información relativa a la sociedad de riego. Si es una sociedad muy alejada de esta red, o para tener datos mejor ajustados al propio contexto, se recomienda la instalación de una pequeña estación en la zona de riego.
- Fertilización. Conocer el plan de abonado de la sociedad en la presente campaña y de años anteriores, así como la producción obtenida en cada una de las parcelas, y los abonados propios de las parcelas, y de las analíticas de hojas tomadas en los meses de noviembre con la información del estado nutricional de la planta. Evaluar el mismo y plantear un ajuste general para la campaña si fuera necesario.

Una vez se inicia el seguimiento:

- En riego, de forma semanal se analizan las necesidades para cada sector de riego, y se hace un seguimiento de los diversos cultivos, ajustando el riego para cada uno de ellos, especialmente con el uso de las sondas de capacitancia y siguiendo la información de la estación agrometeorológica más cercana. En las diversas autonomías hay un servicio de la Red SIAR que asesora. Por ejemplo, las recomendaciones seguidas en la Comunidad Valenciana, a parte del seguimiento en parcela, se han hecho utilizando los datos de <http://riegos.ivia.es/>.
 - En relación a la utilización de la teledetección satélite, para tener más información se recomienda ver el apartado 6.5. Actualmente, y según el cultivo, la utilización de esta tecnología tiene un uso limitado. En algunos casos, como en la vid, o en ciertos tipos de cereal, está más introducido el uso de esta tecnología en relación al riego, incluso de cara a la obtención de una constante de cultivo Kc que permite comprender el estado hídrico de la planta en un momento determinado. En frutales, en estos años se está intensificando su uso, y empiezan a apreciarse resultados en algunos cultivos, como es el caso de los cítricos.
- En fertilización, se recomienda hacer un seguimiento en campo de las plantas, y observar cualquier variación que se produzca en las imágenes obtenidas y en relación a la pérdida de uniformidad en parcela, haciendo seguimiento de las mismas. En su caso, mediante la toma de muestras de hojas de determinadas plantas o zonas, y el seguimiento de su analítica.
 - Aun así, el uso de la teledetección como método no destructivo de evaluación del estado nutricional de la planta que sustituya a otras metodologías, como por ejemplo, la realización de analíticas de hojas sobre muestreos determinados en campo, aún está en pleno desarrollo. Esto es especialmente así en frutales, y para que tenga un efectivo uso de forma en las

sociedades de riego se ha de aumentar en la información que provee las cámaras multiespectrales y espectrales, y en la relación que hay de la reflectancia para una determinada longitud de onda, y la cantidad de un determinado elemento -micro o macro- en la planta en el estado fenológico en el que hagamos la lectura. La proporción de hojas viejas y jóvenes, de madera y de inflorescencia o de fruto en su caso, pueden incidir en los valores de reflectancia o absorbancia que se obtienen.

7.5. Impacto y costes en las sociedades de riego.

7.5.1. Impacto.

A día de hoy el impacto del uso de las tecnologías existentes en España en relación al uso de la agricultura de precisión es variable según el objetivo que se persiga. Los principales ámbitos en una sociedad de riego son:

- Uniformidad. El agricultor y el técnico conocen el estado óptimo que ha de tener un árbol en campo, para un determinado cultivo. Cualquier variación que se detecta vía teledetección puede ayudar a una pronta identificación de las zonas en las que se ha perdido productividad potencial o efectiva en campo, y esto ayuda a hacer un seguimiento adecuado para paliarla y mejorarla. La obtención de imágenes periódicas de forma satélite puede ayudar con este fin, así como la imagen captada desde un UAV con mayor resolución. De una imagen a otra, se puede ver el aumento de esta uniformidad.
 - En parcela. La falta de uniformidad puede derivar en problemas en las instalaciones, variación en el tipo de suelo, en la heterogeneidad de las plantas, etc. Que el propietario conozca que existe esta variación, pueda identificar su causa, y corregirla, puede tener un impacto importante positivo en los resultados de la cosecha, ya sea en calidad de fruto como en cantidad a cosechar.

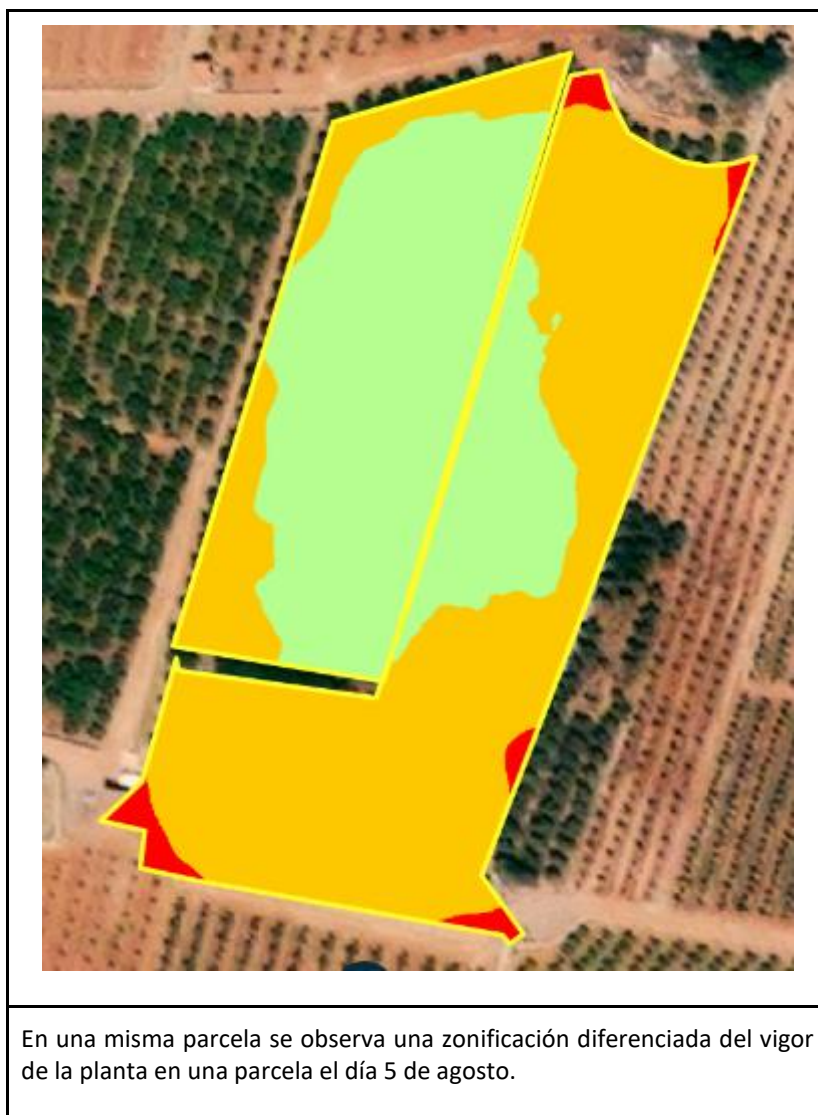
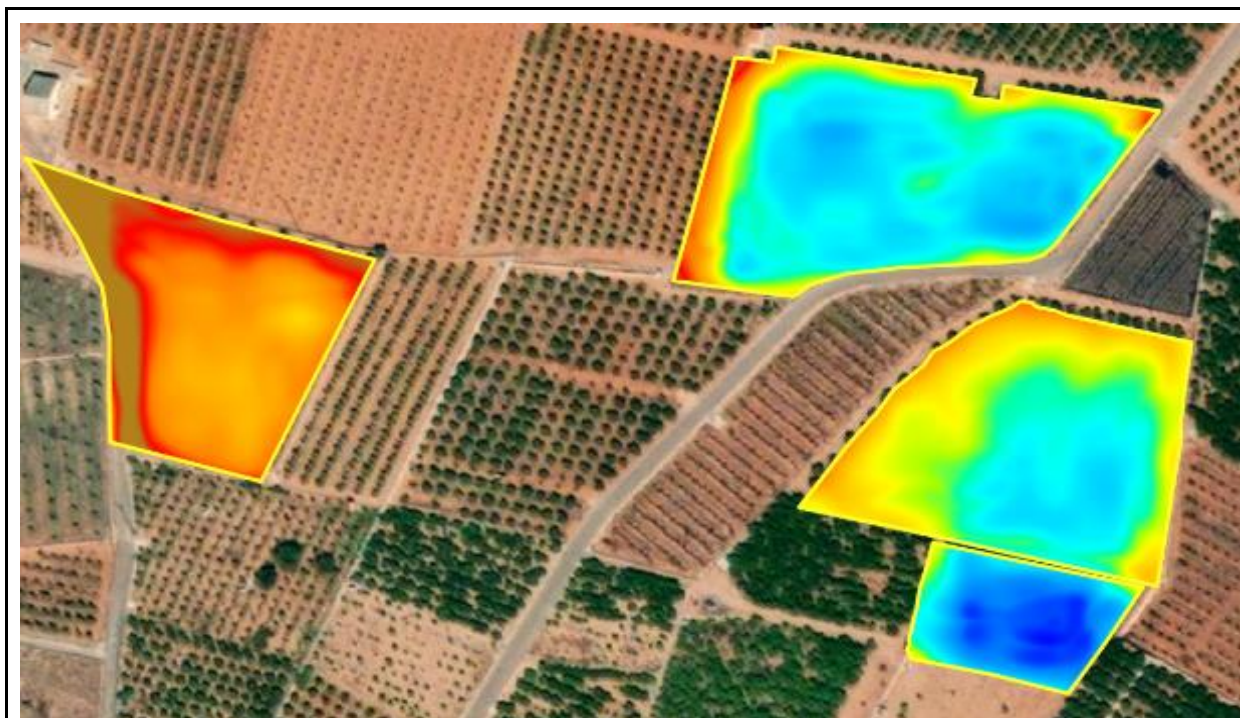


Figura 79. Ejemplo de zonificación diferenciada en parcela

- En una sociedad de riego. Con las imágenes actuales se puede observar si hay variación para un mismo tipo de cultivo, con la misma edad, misma fertilización y labores de cultivo, y que tiene un resultado diferente en las medias de los datos obtenidos. Esto puede derivar en decisiones tomadas en la sociedad de riego, y ayuda a detectar si se tiene que hacer algún ajuste en la sectorización, en los tiempos de fertirrigación, o puede haber algún problema de presiones o caudales diferenciados entre parcelas. La detección de estas variaciones, permite aplicar correcciones en el funcionamiento de las instalaciones de la sociedad, y en las decisiones sobre su uso, y mejorar la uniformidad general en las parcelas atendidas. Esto deriva en unos mejores resultados de producción y calidad generales, incluso antes de aprovechar los beneficios que en uso de agua y de nutrientes permite la agricultura de precisión.



En una misma sociedad de riego se observa el vigor en parcelas de varios propietarios, de la misma variedad, en este caso Clemenules, en un día de agosto de 2021. La divergencia de resultados pone en alerta al técnico que puede actuar en primero entender cuál es la causa de la divergencia, y después en actuar sobre la red, o en ayudar al propietario de la parcela a entender lo que sucede y a mejorar sus resultados.

Figura 80. Ejemplo de zonificación diferenciada entre parcelas de distintos propietarios

- Riego. Tal y como se puede observar en los apartados 6.5 y 6.6, al menos en el uso de la sensorización terrestre se están obteniendo muy buenos resultados desde hace más de una década. Con una misma dotación de agua se están obteniendo mejores producciones y calidades de fruto, e incluso ajusta el uso del coste del agua, que es una partida muy importante en sociedades de riego especialmente basadas en la extracción de agua de acuíferos subterráneos, donde el consumo de energía es alto. El impacto del uso de la teledetección requiere de la interpretación de la información obtenida por parte de un técnico competente. Actualmente, en frutales, es difícil indicar el impacto que esta tecnología está produciendo en la recomendación de riego.
- Fertilización. Como se ha indicado anteriormente, el impacto en la nutrición de esta tecnología está limitado, especialmente en frutales. Aunque de momento no sustituye a otras metodologías, como por ejemplo las analíticas foliares en campo para identificar la situación nutricional de las plantas, sí que puede, combinado con ellas, ayudar a definir actuaciones en zonas determinadas del cultivo que muestren un mismo comportamiento en las imágenes obtenidas para cada longitud de onda, y que de las que se haya identificado claramente en laboratorio la situación nutricional existente.

7.5.2. Costes.

Este es un capítulo importante sobre la implantación de la agricultura de precisión. Para ayudar a su comprensión lo primero que se ha de saber es la diferencia entre qué es un Gasto y qué es un Coste. Gasto,

es aquello que efectivamente paga la sociedad, y se ve en las cuentas anuales de la misma. Coste es lo que realmente cuesta una acción, y a veces coincide con el gasto, y otras veces nos sirve para entender qué está realmente sucediendo en una sociedad, y por tanto, nos ayuda a tomar decisiones adecuadas. Por ejemplo, pongamos que una sonda de capacitancia de la marca XX cuesta 2.000 €, y pagamos esa cantidad que se refleja en nuestra cuenta de la sociedad, es decir, hay un gasto de 2.000 €. Al mismo tiempo, el uso de la sonda nos permite adecuar el riego a las necesidades de la planta, por tanto mejorar la calidad de la fruta, aumentar la producción, y por tanto tener mejores ingresos. También nos permite adecuar el uso del agua en la tarifa energética, que en la mayoría de los casos deriva en un menor coste en el término de energía contratado. Según los cultivos, una mayor adecuación del riego deriva en un mejor estado sanitario de la planta. Por tanto, como gasto quizá vemos sólo esos 2.000 € de inversión en la sonda, pero como costes tenemos que ir viendo anualmente cómo se está reduciendo el gasto energético, y aumentan los ingresos por mejora de calidad y cantidad de fruta. Si los precios de venta bajan, nos puede servir también para seguir siendo competitivos, en el peor de los casos.

Para facilitar los cálculos, y siendo amplia la casuística de sociedades de riego, o de explotaciones privadas de un solo propietario, tenemos el siguiente ejemplo de una sociedad de riego típica de la zona valenciana, de 40 ha de superficie, con 70 propietarios.

Tabla 8. Ejemplo de estimación de costes en una sociedad de riego.

GASTOS			
Partida	Coste sociedad	Coste Hectárea	Coste medio propietario
Evaluación hidráulica y energética	3.000 € Incluye recomendaciones de actuación	75€	43€
Sensorización terrestre, batería de sondas	4 sondas. 2.000 €/sonda Total: 8.000 €, incluyendo software, instalación, etc..	200€	114 €
Acceso a los datos satélite	Según plataforma, de 1 a 3€/ha/año	3 €/ha	1,71 €
Vuelo de UAV	500 €/vuelo 3 el primer año 1.500 €	37,5 €/ha	21 €

Por lo que la implantación de la acción tiene un coste estimado de 275 €/ha, y luego un coste operativo de 3 €/ha. Según necesidades se puede añadir a estos costes el vuelo de dron. Recomendable en la implantación y luego según necesidades en el seguimiento.

Como mejora en los costes de producción tenemos, de forma general:

- Reducción de consumo de agua, y por tanto de energía (no siempre es así, pero la experiencia nos indica que en general se reduce el gasto energético de la sociedad de riego con la utilización de las sondas de capacitancia). Por ejemplo, en una sociedad de riego que tiene un consumo de término de energía de 10.000 € anuales, una reducción de un 15 % del término de energía produce un ahorro anual de 1.500 €, por lo que en pocos años la inversión en esta partida queda pagada.
- Reducción en el término de potencia. La evaluación hidráulica y energética suele ayudar a mejorar el sistema de bombeo. En el caso desarrollado en el proyecto que ha derivado en la presente publicación, tenemos que el término de potencia contratado se ha reducido de 135 kW a 70 kW, siendo este considerable, y pagando en su mejora en pocos años el coste de la evaluación.
- En relación a la utilización de los fertilizantes y de otros productos en campo, no está clara la reducción de costes, puesto que dependerá de la situación inicial de la sociedad. Actualmente, y debido a la caída de precios en ciertos cultivos, las sociedades han tendido a reducir el gasto en esta partida. Ahora, la planta suele ser muy sensible y agradecida a la hora de una aplicación adecuada de los nutrientes, por lo que realmente la mejora en la utilización de los fertilizantes se observa en la mejora de la cosecha en calidad y en producción, y por tanto de potenciales ingresos.
- En relación a la uniformidad de parcela observamos las zonas que no son óptimas. En una parcela en la que aumentamos sólo un 5% las zonas óptimas, deriva directamente en una mejora del 5% de la buena producción, y por tanto los ingresos que obtenemos.

Como conclusión observamos que la implantación y adaptación de nuestras sociedades de riego a la metodología de Agricultura de Precisión, tiene un impacto claro en la mejora de la cantidad de producción y en la calidad de la fruta, y unos costes que son pagados en pocos años por las mejoras producidas. Al mismo tiempo mejora la uniformidad del riego y la fertilización en la sociedad, y por tanto se ajusta mejor el reparto entre todos los socios. Finalmente, cabe indicar que es una metodología en pleno desarrollo, y que por tanto, sin necesidad de realizar inversiones adicionales, nos permite estar preparados para un tipo de agricultura que sin duda será mayoritaria en los próximos lustros. Aquellas sociedades que no se modernicen con esta implantación, se verán lastradas en un mercado cada vez más competitivo en calidad y precio de producto en campo.

8. Tendencias o perspectivas futuras.

Saber hacer de forma precisa en cada etapa fenológica con una combinación patrón variedad, y en un clima y suelos determinados en nuestros cultivos es lo que van buscando los agricultores, y aquello en lo que están poniendo grandes esfuerzos los investigadores y las empresas.

La visión sistémica actual ayuda a comprender que es fundamental atender globalmente un cultivo, y que las mejoras en sanidad vegetal, en riego, o en fertilización, en las prácticas culturales o en la definición de las instalaciones en parcela se ha de ver no sólo individualmente sino en su interacción. Además de esto, la presencia de una mayor variedad de técnicos con saberes muy concretos es necesaria para el diagnóstico continuo de la solución a aplicar. Por lo que la primera tendencia que se está observado es un **mayor trabajo**

en equipo entre Ingenieros Agrónomos o Agrícolas de cada especialidad, así como con Biólogos, Bioquímicos, Biotecnólogos, Ambientólogos o Climatólogos, pero también con ingenieros de sistemas especializados en el software -Inteligencia artificial, Aprendizaje automático- o en el hardware -sensorización o robótica-, combinados con ingenieros o técnicos de las más diversas disciplinas, o economistas que nos ayuden a entender el impacto económico de todo aquello que vamos haciendo.

Una gran oportunidad se abre para la creación de nuevos puestos de trabajo con alta tecnificación en la agricultura. Por tanto, otra tendencia creciente es la aparición de **nuevas empresas** que atiendan cada una de las disciplinas anteriormente descritas, y que dinamicen el sector.

A nivel tecnológico, comprender y entender qué sucede en el complejo suelo-planta-atmósfera es básico para poder avanzar.

En este sentido necesitamos una **mejora de las predicciones meteorológicas** al facilitar el uso de estaciones virtuales y el aviso de eventos meteorológicos potencialmente dañinos para las explotaciones. En el suelo, se sigue trabajando en la puesta a punto de **sondas multisensores capaces de monitorizar nitratos**, entre otros compuestos químicos, y conocer a tiempo real qué cantidad de nutrientes está absorbiendo la planta en un suelo determinado. Más aún, la tecnología sigue avanzando para poder comprender esto no sólo dentro de una **agricultura convencional**, sino también dentro de una **agricultura ecológica**, donde la variabilidad de productos es mayor, y el conocimiento de su comportamiento real en campo es mucho más complejo.

En la planta, también se observa necesario la presencia de un sensor de planta que permita la **medida del potencial hídrico en continuo** sin los problemas actuales de creación de callo que limitan la duración útil de la información que se genera.

Por otro lado, a nivel de sensorización aérea hay mucho trabajo que se está desarrollando. Especialmente es necesario que **auge la capacidad de resolución de la imagen** captada mediante **cámaras multiespectrales, e hiperespectrales** montadas en **satélite**. Al mismo tiempo, avanzar en el tratamiento automatizado de la información agronómica de interés desde el dato crudo captado por una cámara, hasta proporcionar un **diagnóstico** de cuál es la situación hídrica, o nutricional, o sanitaria, o de previsión de cosecha de una planta, o poder detectar la profundidad de la humedad del suelo.

Al mismo tiempo, una vez avancemos en el conocimiento de lo que sucede realmente a la planta en un momento determinado, y podamos hacer un buen diagnóstico de qué hacer para acompañarla en su desarrollo y producción, hemos de tener una infraestructura que permita aplicar de forma diferencial la solución decidida en cada parcela. Para ello es necesario ampliar las sectorizaciones de las sociedades de riego. La instalación de **nuevas fuentes de energía renovable**, ya a disposición de los agricultores, así como de **baterías de acumulación de energía**, todavía muy caras y en fase de desarrollo, permitirán un riego adecuado no sólo de día, sino también de noche, y una discriminación mayor entre el tipo de soluciones a aplicar en cada zona. Al mismo tiempo es fundamental la modernización de las sociedades de riego con la incorporación de tecnologías que permitan el **monitoreo de lo que sucede en la red**, así como la incorporación de técnicos que sepan tomar las decisiones adecuadas, o de **sistemas que sepan dar la solución adecuada de forma**

automática. Es decir, cerrar el círculo entre la captación de la información, el análisis de la misma, la generación de un diagnóstico, y la aplicación de la solución adecuada en el momento preciso.

Cierto es, que esto depende de la estructura de los tamaños de explotación, y de la capacitación de nuestros **agricultores**, técnicos, y otros profesionales del campo, que seguirán siendo el eje del trabajo agrario. Por lo que un importante empuje en la formación, así como en la **adecuación de la propuesta formativa se exige a nuestras universidades y centros de educación profesional.**

Y por supuesto, la aparición de **herramientas financieras y apoyo administrativo** adecuado que permitan **esta revolución en el campo, que vaticinamos que en menos de una década va a ser mayoritaria** en España.

9. Conclusión.

El presente documento es uno de los frutos del trabajo desarrollado por el trabajo en común de organizaciones sociales como la Asociación Valenciana de Agricultores y Asaja-Málaga, de centros de I+D+i como el IVIA y el CSIC, o de centros de formación e investigación, como la Universidad Politécnica de Valencia, de empresas como Hemav y Dimagro, o profesionales como Ignacio Puech Suanzes y Gil María Campos Alabau, con una interacción continua con los agricultores de Málaga, y las Sociedades de Riego de *Santa Paula* en Valencia y de *La Senyera* en Castellón. Con visiones y tradiciones distintas, con misiones diferentes, hemos ido aprendiendo juntos en un campo tan complejo como el de la Agricultura de Precisión.

Desde el lado de los técnicos siempre ha estado en mente el pensamiento de “si lo que hacemos no es útil para el agricultor, por mucha tecnología que aporte, no sirve”. Y del lado del agricultor ha estado aprovechar la oportunidad de aplicar técnicas contrastadas.

En las zonas en las que hemos trabajado ha quedado mucho aprendizaje, y un impacto positivo en el uso del agua y de los fertilizantes, así como en la mejora de la calidad de las cosechas. Aunque también ha quedado escepticismo y duda con respecto a los resultados que aplican estas tecnologías por parte de algunos productores. Gracias a estos últimos hemos podido también retar cada una de las acciones que hemos hecho para mejorar el servicio hacia ellos.

En conclusión, este libro es una ayuda más en este camino de aprendizaje y difusión de una metodología de trabajo que está revolucionando ya el campo. Un trabajo que estamos construyendo entre todos, con humildad, pero con constancia. En nuestro conocimiento hemos constatado tecnologías probadas, y hemos delimitado mejor por dónde tenemos que seguir innovando e investigando, así como qué técnicas positivas hemos de seguir desarrollando.

Esto es lo que hemos ofrecido en el libro.

Y también hemos aprendido, que gracias a la Unión Europea, y al esfuerzo económico de los ciudadanos españoles y europeos, hemos podido trabajar para la mejora de una agricultura en la que creemos para que siga ayudando al desarrollo de nuestra sociedad y de nuestro medio natural.

10. Referencias.

- [1] ISPA, 2019. Precision Agriculture definition [WWW Document]. Int. Soc. Precis. Agric. URL <https://www.springer.com/journal/11119/updates> (accessed 10.13.20).
- [2] Van Maanen, J., 1998. Qualitative studies of organizations. *Administrative Science Quarterly (ASQ)*.
- [3] Dyer, J., Gregersen, H., Christensen, C.M. 2012. El ADN del innovador: Claves para dominar las cinco habilidades que necesitan los inovadores. Deusto.
- [4] Senge, P. M., Smith, B., Kruschwitz, N., Laur, J. , Schley, S., 2008 . The Necessary Revolution . Doubleday.
- [5] Ballester, C., Jiménez-Bello, M.A., Castel, J.R., Intrigliolo, D.S., 2013. Usefulness of thermography for plant water stress detection in citrus and persimmon trees. *Agricultural and Forest Meteorology*. 168:120-129.
- [6] González-Altozano, P., Castel, J.R., 2003. Riego deficitario controlado en 'Clementina de Nules'. I. Efectos sobre la producción y la calidad de la fruta. *Spanish Journal of Agricultural Research*. 1:81-92.
- [7] Ballester, C., Castel, J., Abd El-Mageed, T. A., Castel, J.R., Intrigliolo, D.S., 2014. Long-term response of 'Clementina de Nules' citrus trees to summer regulated deficit irrigation. *Agricultural Water Management*. 138:78-84.
- [8] Marschner, P., 2012 *Mineral Nutrition of Higher Plants*, third ed, London: Elsevier.
- [9] Epstein, E. and Bloom, A.J., 2005. *Mineral Nutrition of Plants: Principles and Perspectives*. 2nd Edition, Sinauer Associates, Sunderland.
- [10] Quaggio, J.A., Souza, T.R., Zambrosi, F.C.B., Boaretto, R.M., Mattos Jr., D., 2014. Nitrogen-fertilizer forms affect the nitrogen-use efficiency in fertigated citrus groves. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 177: 404–411.
- [11] Obreza, T.A., Rouse, R.E., Morgan, K.T., 2008. Managing phosphorus for citrus yield and fruit quality in developing orchards. *Hort. Sci.* 43, 2162–2166.
- [12] Alva, A.K., Mattos Jr., D., Paramasivam, S., Patil, B., Dou, H., Sajwan, K., 2006. Potassium management for optimizing citrus production and quality. *Int. J. Fruit Sci.* 6 (1), 3–43.
- [13] Mattos Jr., D., Quaggio, J.A., Cantarella, H., Carvalho, S.A., 2004. Modelos de resposta do tangor Murcott à fertilização com N, P e K. *Rev. Bras. Frutic.* 26, 164-167.
- [14] White, P.J., Broadley, M.R., 2003. Calcium in plants. *Ann. Bot.* 92, 487–511.
- [15] Morton, A.R., Trollove, S.N., Kerckhoffs, L.H.J., 2008. Magnesium deficiency in citrus grown in the Gisborne district of New Zealand. *N. Z. J. Crop. Hortic. Sci.* 36 (3), 199-213.
- [16] Sewelam, N., Kazan, K., Schenk, P.M., 2016. Global plant stress signaling: reactive oxygen species at the cross-road. *Front. Plant Sci.* 7, 187.
- [17] Zekri, M., Obreza, T.A., 2015. *Micronutrient Deficiencies in Citrus: Iron, Zinc, and Manganese*. University of Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, EDIS.
- [18] Mattos Jr., D., Kadyampakeni, D.M., Quiñones, A., Boaretto, R.M., Morgan, K.T., Quaggio, J.A., 2020. Soil and nutrition interactions, In: *The Genus Citrus*, Woodhead Publishing (ED) pp. 311-331.

- [19] Martínez-Cuenca, M.R., Primo-Capella, A., Quiñones, A., Bermejo, A., Forner-Giner, M.A., 2017. Rootstock influence on iron uptake responses in Citrus leaves and their regulation under the Fe paradox effect. *Peer J.* 5.
- [20] Wu, X., Riaz, M., Yan, L., Du, C., Liu, Y., Jiang, C., 2017. Boron deficiency in trifoliolate orange induces changes in pectin composition and architecture of components in root cell walls. *Front. Plant Sci.* 8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01882>.
- [21] Hippler, F.W.R., Boaretto, R.M., Verónica, L.D., Gomes, G.O.F., Quaggio, J.A., Quiñones, A., Mattos Jr., D., 2017. Revisiting nutrient management for Citrus production: to what extent does molybdenum affect nitrogen assimilation of trees? *Sci. Hortic.* 225 (18), 462–470.
- [22] Pestana, M., Beja, P., Correia, P.J., Verennes, A., Faria, E.A., 2005. Relationships between nutrient composition of flowers and fruit quality in orange trees grown in calcareous soil. *Tree Physiol.* 25, 761–767
- [23] Pestana, M., Correia, P.J., Varennes, A., Abadía, J., Faria, E.A., 2001a. The use of floral analysis to diagnose the nutritional status of orange trees. *J. Plant Nutr.* 24, 1913–1923.
- [24] Lacertosa, G., Giuffrida, A., Mennone, C., 2001. Stato nutrizionale e qualità dei frutti in agrumeti del metapontino. In: XVII Convegno SICA, pp. 387–394.
- [25] Menino, M., 2012. Leaf analysis in citrus: interpretation tools. In: Srivastava, A.K. (Ed.), *Advances in Citrus Nutrition*. Springer Science, Dordrecht, pp. 59-79.
- [26] Bould, C., 1983. *Diagnosis of Mineral Disorder in Plants-Principles*. H.M. Stationery Office, New York, p. 170.
- [27] Obreza, T.A., Rouse, R.E., Morgan, K.T., 2008. Managing phosphorus for citrus yield and fruit quality in developing orchards. *Hort. Sci.* 43, 2162-2166.
- [28] Legaz, F., Serna, M.D., Primo-Millo, E., 1995. Mobilization of the reserve N in citrus. *Plant Soil* 173, 205–210.
- [29] Khan, I.A., Srikandakumar, A., Embleton, T.W., 2000. Interrelationship of nutrient status of orange leaves from fruiting and non-fruiting terminals and their conversion factors. *Proc. Int. Soc. Citricult.* 433–434.
- [30] Quiñones, A., Martínez-Alcántara, B., Primo-Millo, E., Legaz, F., 2012. Fertigation: Concept and Application in Citrus. In: Srivastava, A.K. (Ed.), *Advances in Citrus Nutrition*. Springer Science, Dordrecht, pp. 281-301.
- [31] Arviza, J., Balbastre, I., Turegano, J. V., Manzano, J., Guillen, S. Martínez, F., Cano, L., Royuela, A. 2001. Proyecto de Redes Colectivas de Riego a Presión. Colegio Oficial de Ingenieros Agrónomos de Levante (COIAL). Valencia
- [32] Taiz Z. E. Zeiger, L., 2006, *Plant physiology*. 3rd Edition, Sunderland-Massachusetts: Sinauer Associates Inc.
- [33] Doorenbos, J., Pruitt, W.O., 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper 24, (Rev.)*, FAO, Rome, p 156.
- [34] Allen, R.G., Pereira, R.S., Raes, D. & Smith, M., 1998. *Crop Evapotranspiration- Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. Irrigation and Drainage 56. FAO, Roma, p. 56.
- [35] Castel, J. R., 2005. Evapotranspiración, balance de energía y coeficiente de cultivo de plantaciones de cítricos en Valencia. *Monogr. INIA*, 17, 210-219.

- [36] UNE-EN 15097:2007 Técnicas de riego. Riego localizado. Evaluación hidráulica.
- [37] Turner, N.C. 1981. Techniques and experimental approaches for the measurement of plant water status. *Plant and Soil*, 58(1-3):339-366.
- [38] Ballester, C; Castel, J.; Intrigliolo, D.S.; Castel, J.R. 2013. Response of navel 'Lane late' citrus trees to regulated deficit irrigation: yield components and fruit composition. *Irrigation Science*, 31:333-341.
- [39] Martínez-Gimeno, M.A.; Bonet, L.; Provenzano, G.; Badal, E.; Intrigliolo, D.S.; Ballester, C. 2018. Assessment of yield and water productivity of clementine trees under surface and subsurface drip irrigation. *Agricultural Water Management*, 206:209-2016.
- [40] Robles, J.M.; Botía, P.; Pérez-Pérez, J.G., 2016. Subsurface drip irrigation affects trunk diameter fluctuations in lemon trees, in comparison with surface drip irrigation. *Agricultural Water Management*, 165:11-21.
- [41] Pérez-Pérez, J.G.; Robles, J.M.; Botía, P., 2014. Effects of deficit irrigation in different fruit growth stages on 'Star Ruby' grapefruit trees in semi-arid conditions. *Agricultural Water Management*, 133:44-54.
- [42] Martínez-Martínez, E., 2010. Tesis doctoral: Sondas lisimétricas de succión como herramientas edáficas claves en métodos dinámicos de control y seguimiento del sistema Suelo-Planta-Agua. Universidad Autónoma de Madrid. Facultad de Ciencias.
- [43] Pérez-Pérez, J.G.; Robles, J.M.; Botía, P., 2014. Effects of deficit irrigation in different fruit growth stages on 'Star Ruby' grapefruit trees in semi-arid conditions. *Agricultural Water Management*, 133:44-54.
- [44] Regalado, C.M., Ritter, A., Rodríguez, R.M y Socorro, A.R., 2005. Diseño experimental para la extracción de solución del suelo en régimen de insaturación (≤ 600 KPa). En: *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo Vol. VII*. F.J. Samper Calvete y A. Paz González.
- [45] Hernández, J., Montaner, D., 2009. Patrones De Respuesta Espectral." *Lab. Geomática y Ecología del Paisaje (GEP) - Facultad de Ciencias Forestales*. 1-14 .
- [46] Gilabert, M.A., González-Piqueras J., García-Haro, J., 1997. Acerca de los índices de vegetación. *Revista de Teledetección* 8: 1-10.
- [47] Jensen J. R., 2000 *Remote Sensing of the Environment: An Earth resources perspective*. Upper Saddle River, NJ. Prentice-Hall.
- [48] Blasco, J., Aleixos, N., Rey, B., López, S., Alegre, V., Ruiz, C., Aguilar E., Cubero S., 2018. Solución robotizada para prever y detectar *Xylella fastidiosa*. *Phytoma*, 304, 54-67.
- [49] Blasco, J., Calderon, R., Aleixos, N., Camino, C., Beck, P.S.A., Rey, B., Hornero, A., López, S., Hernández-Clemente, R., Alegre, V., Kattenborn, T., Montes-Borrego, M., Susca, L., Morelli, M., Ruiz, C., Gonzalez-Dugo, V., North, P.R.J., Aguilar, E., Landa, B.B., Boscia, D., Saponari, M., Chueca, P., Zarco-Tejada, P.J., Cubero, S., Navas-Cortes, J.A., 2018. Avances en teledetección para la prevención y detección temprana de *Xylella fastidiosa* en el marco de los proyectos H2020 POnTE y XF-ACTORS. *Agricultura: revista agropecuaria*, 1023, 44-48.
- [50] Barman, U. B., Choudhury R.D., 2020. Smartphone image based digital chlorophyll meter to estimate the value of citrus leaves chlorophyll using Linear Regression, LMBP-ANN and SCGBP-ANN, *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2020.01.005>.

- [51] Lorente, D., Aleixos, N., Gómez-Sanchis, J., Cubero, S., García-Navarrete, O.L., Blasco, J., 2012. Recent advances and applications of hyperspectral imaging for fruit and vegetable quality assessment. *Food and Bioprocess Technology* 5(4), 1121-1142.
- [52] González-González, M.G., Blasco, J., Cubero, S., Chueca, P., 2021. Automated detection of *Tetranychus urticae* in citrus leaves based on colour and VIS/NIR hyperspectral imaging. *Agronomy*, 11(5), 1002. DOI: 10.3390/agronomy11051002.
- [53] Gilabert, M.A., González-Piqueras J., García-Haro, J., 1997. Acerca de los índices de vegetación. *Revista de Teledetección* 8: 1-10.
- [54] Xue J., Su, B., 2017. Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications. *Journal of Sensors*, 1353691, DOI 10.1155/2017/1353691m
- [55] Oliveira da Silva, B.A. da Silva, Souza, C. F., de Azevedo B. M., Bassoi, L.H., Vasconcelos, D. V. , do Bonfim, G.V., Manzano Juárez, J., dos Santos, A., Carneiro, F. M., 2020. Irrigation in the age of agriculture 4.0: management, monitoring and precision. *Revista Ciência Agrônômica*, v. 51, Special Agriculture 4.0, e20207695.
- [56] Domínguez-Niño, J.M., Oliver-Manera, J., Girona, J. , Casadesús, J., 2020. Differential irrigation scheduling by an automated algorithm of water balance tuned by capacitance-type soil moisture sensors. *Agricultural Water Management*. 228. 1-11.
- [57] Rossman, L. A., 2000. Epanet 2, users manual. Cincinnati, USA: Water Supply and Water Resources Division. National Risk. Management Research Laboratory. <https://www.epa.gov/water-research/epanet>.
- [58] Alonso Campos J.C., Jiménez-Bello, M.A., Martínez Alzamora, F., 2020. Real-time energy optimization of irrigation scheduling by parallel multi-objective genetic algorithms. *Agric Water Manag.* <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105857>.
- [59] Ortega-Reig, M., Sanchis-Ibor, C., Palau-Salvador, G., García-Mollá, M., Avellá-Reus, L., 2017. Institutional and management implications of drip irrigation introduction in collective irrigation systems in Spain. *Agriculture Water Management*. 187, 164-172. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.03.009>.
- [60] Servicio de Regadíos. Dirección General de Agricultura, Ganadería y Pesca. 2020. Guía metodológica para la compatibilización de la fertirrigación comunitaria con la agricultura ecológica y el policultivo y para su empleo hacia una producción ecológica comunitaria. Generalitat Valenciana. Conselleria de Agricultura Desarrollo Rural, emergencia climática y transición ecológica.
- [61] Jiménez Bello, M. A., Martínez, F., Bou, V., & Bartolín, H., 2011. Analysis, assessment, and improvement of fertilizer distribution in pressure irrigation systems. *Irrigation Science*, 29(1) <https://link.springer.com/article/10.1007/s00271-010-0215-7>.
- [62] Jiménez Bello, MA., Manzano Juárez, J, Alonso Campos, J.C, Martínez Alzamora F., 2020. Metodología para minimizar los tiempos de llegada en una red de riego a presión. XXXVIII Congreso Nacional de Riegos. Cartagena (Spain).



Grupo Operativo de Agricultura de Precisión en Regadío y Fertilización de Cítricos



Unión Europea
Fondo Europeo Agrícola
de Desarrollo Rural
Europa invierte en las zonas rurales



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE AGRICULTURA Y PESCA,
ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE



PNDR
Programa Nacional
de Desarrollo Rural
2014-2020

Financiación del Proyecto: 393.300,35€. El 80% ha sido cofinanciado por la Unión Europea.