#107

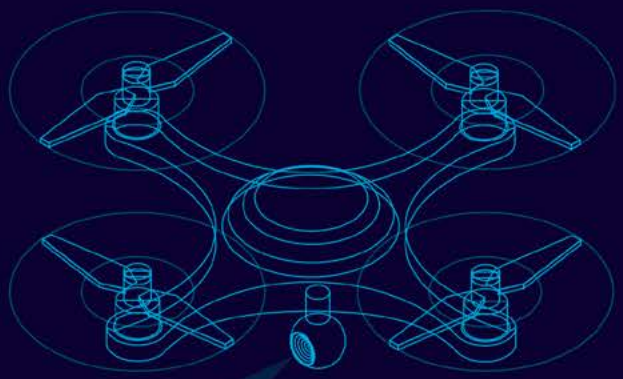
15 ANYS 2005 / 2020

DossierTècnic

Innovació i transferència de coneixement

Desembre 2020

Agricultura de precisió: aplicacions al reg



Pàg 02 Presentació Pàg 03 L'Agricultura de Precisió: què és i com pot ajudar l'agricultura catalana? Pàg 10 Oportunitats del reg de precisió Pàg 14 Teledetecció aplicada a l'agricultura i maneig del reg Pàg 20 Estimació de l'evapotranspiració amb satèl·lits Pàg 24 Teledetecció tèrmica aerotransportada per a la detecció de l'estat hídric dels cultius Pàg 28 Lògica del control del reg Pàg 32 Sensors de sòl per optimitzar la zonificació del reg Pàg 37 Fenotipatge del cultius extensius mitjançant eines de teledetecció Pàg 41 Parlem amb: Elías Fereres

Generalitat de Catalunya
Departament d'Agricultura, Ramaderia, Pesca i Alimentació

Rural Cat

Carmel Mòdol Bresolí
Director general d'Alimentació, Qualitat i Indústries Agroalimentàries

L'agricultura de precisió permet una gestió acurada dels recursos naturals

Catalunya es caracteritza per una climatologia majoritàriament mediterrània amb una pluviometria irregular i alguns períodes de sequera. A més, en la situació actual, ens trobem davant la inseguretat de les conseqüències del canvi climàtic que afectarà l'agricultura i comportarà la necessitat de millorar encara més la gestió de l'aigua de reg. En aquest context de sostenibilitat mediambiental, cal gestionar acuradament els recursos naturals.

Un dels factors clau per aconseguir-ho serà la innovació tecnològica i la seva transferència. L'agricultura és un sector cada cop més tecnificat, amb la implantació continuada d'innovació tecnològica. L'agricultura de precisió permet la gestió de diferents problemàtiques en sòls i cultius amb la integració de moltes dades i ofereix una eina de decisió a l'agricultor en la gestió de les finques per millorar la productivitat i oferir una millor sostenibilitat territorial. En aquest camp, els centres d'investigació, les universitats i, fins i tot, les empreses privades del sector han complert els objectius de millorar les estratègies. Podem veure com els satèl·lits, les sondes, els drons i els sensors recullen informació que és processada i analitzada, bé per programes informàtics, bé per aplicacions al mòbil, i contrastada per personal tècnic que finalment pren decisions cada cop més "precises".

Cada vegada trobem tecnologies més adaptades a millorar l'eficiència en l'ús de l'aigua i de control del reg que aporten avantatges a l'agricultor, al medi i a la societat. En utilitzar reg de precisió com a estratègia de gestió del reg, s'adapten encara més les necessitats hídriques dels cultius al reg. L'evolució de la gestió del reg a partir del balanç hídric, millorat amb el control de sensors i la detecció amb satèl·lits, permet obtenir informació que s'utilitza per a l'optimització del reg a través de les simulacions de cultius i així planificar les campanyes de reg. La Unió Europea ha empès, a través de programes d'investigació i ajudes a les modernitzacions dels regadius, tota aquesta creació de tecnologia en la millora de l'eficiència del reg. La tecnologia hi és, però s'ha de poder oferir al sector perquè sigui per a ús comú del regant o les comunitats de regants: cal fer la formació i la transferència tecnològica al regant. Cal que l'agricultor es trobi acompanyat per incorporar-les en el seu dia a dia.

Agricultura i reg de precisió són la base d'aquest *Dossier Tècnic* on s'expliquen molts d'aquests elements i algunes de les línies d'investigació orientades a l'ús eficient de l'aigua de reg, factor vital per poder millorar la gestió de l'aigua si, com es preveu, cada cop hi haurà més competència d'ús i potser menys disponibilitat total. És un repàs a les innovacions que han sorgit els últims anys d'equips pioners en la investigació del reg i de l'agricultura de precisió. El Departament sempre ha impulsat aquesta recerca i també la millora de les instal·lacions de les comunitats de regants i la seva modernització, i de les instal·lacions de reg de la parcel·la. Per a la transmissió del coneixement i la formació del regant, el DARP ha apostat des de fa anys per l'Oficina del Regant-EA de Tàrrega. Aquesta eina, conjuntament amb altres actors, és necessària per transferir els nous coneixements tecnològics al sector per poder millorar contínuament. També per poder formar nous regants i comunitats de regants com a eina per a la millora de l'eficiència del reg. Un dels objectius de l'Oficina del Regant-EA Tàrrega, on col·labora l'IRTA i Infraestructures.cat, és acompanyar el sector del reg en tot allò que necessiti per ser sostenible econòmicament, socialment i mediambientalment.

Agraeixo a tots els autors la seva bona disposició a ser presents en cada pàgina d'aquest *Dossier Tècnic* i iniciar, així, el que pot ser una sèrie de monogràfics centrats en l'agricultura de precisió.

Dossier Tècnic. Núm. 107
Agricultura de precisió: aplicacions al reg
Desembre 2020.

Edició
Direcció General d'Alimentació, Qualitat i Indústries Agroalimentàries.

Consell de Redacció
Carmel Mòdol Bresolí, Jaume Sió Torres, Joan Gòdia Tresànchez, Maria Glòria Cugat Pujol, Neus Ferrete Gracia, Mercè Soler Barrasús, Enric Vadell Guiral, Jordi Ruiz Olmo, Rosario Allué Puyuelo, Laura Dalmau Pol, Valentí Marco Sanz, Antoni Enjuanes Puyol, Joan Barniol Garriga, Isaac Salvatierra Pujol, Maria Josep de Ribot Porta, Joan S. Minguet Pla, Mireia Medina Sala, Rosa Cubel Muñoz.

Coordinació i producció
Maria Josep de Ribot Porta, Imma Malet Prat, Annabel Teixidó Martínez, Ramon Cuadros Claria, Maria Teresa Sisquella Vila i Xavier Vallverdú Llauradó.

Correcció i assessorament lingüístic
Joan Ignasi Elias Cruz i Lluís Piqueres Pla.

Grafisme i maquetació
Carlos Guzmán Lorente.

Impressió
Romanyà Valls, S.A.

Dipòsit legal
B-16786-05.
ISSN: 1699-5465.

El contingut dels articles és responsabilitat dels/de les autors/es. DOSSIER TÈCNIC no s'hi identifica necessàriament. S'autoritza la reproducció total o parcial dels articles citant-ne la font i l'autoria.

Departament d'Agricultura, Ramaderia, Pesca i Alimentació.
Gran Via de les Corts Catalanes, 612-614. 08007 - Barcelona

Més recursos, enllaços i versió electrònica:
https://ruralcat.gencat.cat
http://agricultura.gencat.cat/
e-mail: sia.daam@gencat.cat

Portada:
Autor: Carlos Guzmán Lorente

L'AGRICULTURA DE PRECISIÓ: què és i com pot ajudar l'agricultura catalana?

01. El nom fa la cosa

Agricultura de Precisió, Agricultura 4.0, Agricultura digital, Smart Agriculture, AgriTech, AgTech, AgroSmart, Big Data, Internet de les coses, Intel·ligència Artificial, etc. Ja fa temps que llegim i sentim termes com aquests, més o menys enginyosos, per referir-nos al futur de l'agricultura. Però, què hi ha darrera d'aquests noms? Quina base tenen? Ens en podem refiar? Agricultura de Precisió va ser el primer de tots, però Agricultura 4.0 sona amb força. Aquest darrer és un terme importat de la indústria i la idea principal és la interconnexió i la integració de tots els sistemes automàtics que ja estan operant en una indústria per a aconseguir sistemes ciberfísics de jerarquia superior que controlin la producció de forma global i autònoma. En canvi, l'Agricultura de Precisió té una llarga història darrera i milions d'hectàrees arreu del món on ja es practica. Per tant, hi ha un ampli col·lectiu d'agricultors/es i tot un seguit d'assessors/es i d'empreses que li donen suport. A més a més, darrera, també hi ha una comunitat científica internacional que investiga, es reuneix periòdicament en congressos i transfereix els resultats obtinguts al sector. Aquesta comunitat està aixoplugada per la Societat Internacional d'Agricultura de Precisió, la ISPA, de l'anglès *International Society of Precision Agriculture* (fig. 1).

Figura 1. *Societat Internacional d'Agricultura de Precisió. Font: www.ispag.org*

Figura 2. *Els sistemes satel·litaris de navegació global es fan servir per a la navegació d'equips i la georeferenciació de les dades obtingudes. Font: European Space Agency, ESA.*

02. Una mica d'història

La història de l'Agricultura de Precisió (AP) arrenca a principis de la dècada dels 80 als Estats Units. Els primer treballs dels pioners de l'AP es van centrar en l'anàlisi de la variabilitat de les propietats del sòl, de manera que no és d'estranyar que el nom que van triar per al primer simposi fos el de Maneig de Cultius Específic segons el Sòl *(Soil Specific Crop Management)*, que es va celebrar a Minneapolis, EUA, el 1992. A partir de llavors, el nom de totes aquestes novetats va anar mutant fins arribar al de Maneig Específic Localitzat *(Site-Specific Management)*, al d'aplicació variable *(Variable-Rate Application)* i, finalment, a l'actual d'Agricultura de Precisió.

Als anys 80, els desenvolupaments van ser eminentment teòrics i van tenir poca aplicació pràctica degut a les limitacions tecnològiques de l'època. A poc a poc, l'ús d'ordinadors, amb

programes estadístics, fulls de càlcul i sistemes d'informació geogràfica (GIS/SIG), juntament amb els primers receptors GPS oberts a l'ús civil, van fer que als anys 90 es comencessin a portar a terme assajos pràctics. Així, per exemple, els primers articles de recerca en presentar mapes de collita fets a partir d'incorporar sensors i receptors GPS en recol·lectores de gra es van publicar el 1987, el 1989 i el 1991. L'any 1993 ja es va patentar un pivot de reg capaç de dosificar de forma variable la quantitat d'aigua de reg.

Si bé també es pot fer AP sense sistemes de posicionament com el GPS, és evident que la seva aparició va ser un catalitzador per a l'AP. Actualment, a més del sistema americà GPS, també es poden fer servir tres altres Sistemes Satel·litaris de Navegació Global o SSNG (en anglès GNSS): l'europeu Galileo, el rus Glonass i el xines Beidou (fig. 2).

L'Agricultura de Precisió va començar a desenvolupar-se als anys 80 i inicialment estava centrada només en la variabilitat dels sòls.

Tot i la dilatada història de l'AP, no va ser fins a l'any 2010 que es va fundar la Societat Internacional d'Agricultura de Precisió. Aquesta societat s'encarrega de dinamitzar la comunitat internacional d'investigadors de l'AP. Una de les activitats principals és organitzar el Congrés Internacional d'Agricultura de Precisió (ICPA) que es fa biennalment als Estats Unitats i donar suport als congressos europeu, africà i asiàtic-australasiàtic, entre altres tasques.
Des del començament de l'AP, hi va haver diversos autors que van proposar definicions d'AP, cap d'elles, però, va ser adoptada per la ISPA. L'any 2018 es va iniciar un procés per a establir la definició oficial, que va concloure l'any 2019 amb la definició següent:
L'Agricultura de Precisió és una estratègia de maneig que recull, processa i analitza dades temporals, espacials i individuals i les combina amb altres informacions per a donar suport a la presa de decisions de maneig d'acord amb la variabilitat estimada per a millorar l'eficiència en l'ús de recursos, la productivitat, la qualitat, la rendibilitat i la sostenibilitat de la producció agrícola.

Aquesta definició és la traducció oficial al català de la versió anglesa i es pot trobar a la pàgina de la ISPA (www.ispag.org/about/definition). A més de les derivades evidents de Viticultura, Fructicultura o Ramaderia de Precisió, a poc a poc van apareixent altres disciplines que incorporen el terme precisió. Aquest és el cas del Periodisme de Precisió i de la Medicina de Precisió, per exemple. Aquesta darrera analitza la variabilitat entre individus (genètica, ambiental i en l'estil de vida) per tal de personalitzar al màxim possible el tractament prescrit.

03. El cicle de l'Agricultura de Precisió

La definició de l'AP de la ISPA es pot representar esquemàticament amb el cicle de l'AP (fig. 3). El cicle té quatre etapes i comença amb l'adquisició de totes les dades possibles del cultiu i del seu entorn. Aquesta adquisició de dades es fa amb les eines de què es disposi en cada situació, que poden ser sensors propers o remots, receptors SSNG/GNSS, observacions visuals, dades digitalitzades obertes o particulars, mostres obtingudes al camp, etc. El resultat d'aquesta etapa són dades georeferenciades, és a dir, amb coordenades absolutes associades que permeten situar-les exactament al lloc on s'han obtingut.

Tanmateix, aquestes dades no tenen cap valor per elles mateixes si no es converteixen en informació útil per a l'agricultor/a. Això és el que es duu a terme a la segona etapa. Les dades obtingudes s'han d'emma-

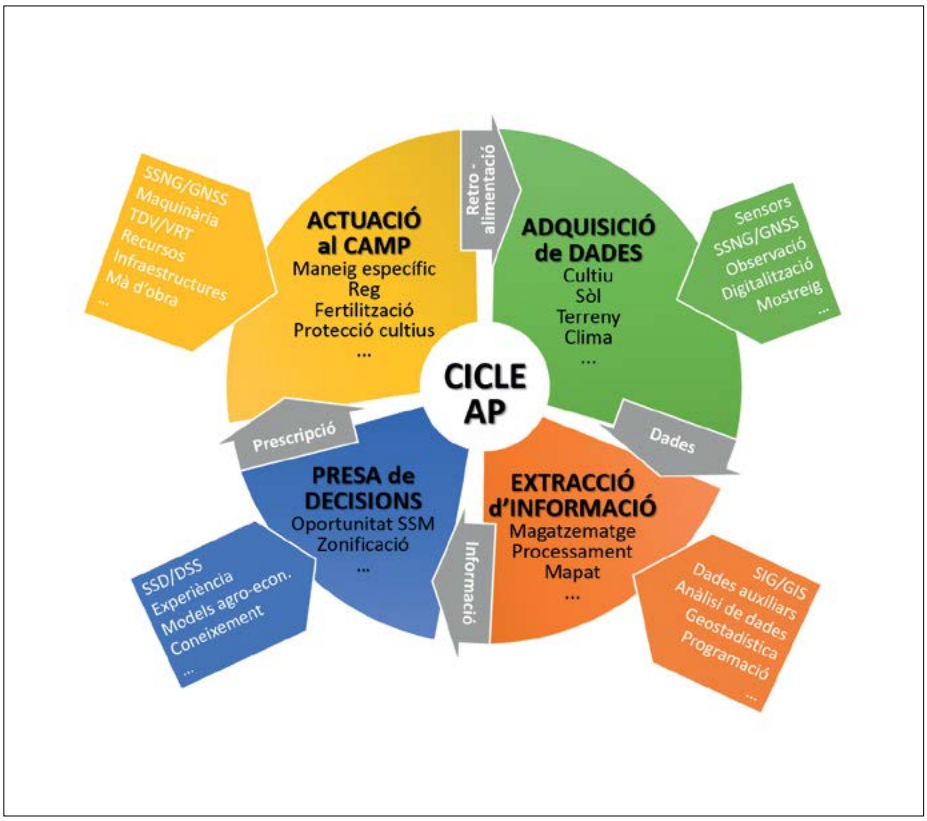


Figura 3. *Cicle de l'Agricultura de Precisió amb les eines i recursos emprats en cada etapa. Font: Grup de Recerca en AgròTICa i Agricultura de Precisió, GRAP.*

gatzemar, processar i analitzar per a extreure'n informació. Aquests processos es faran utilitzant eines com poden ser programes informàtics de processament, processos d'anàlisi estadística i espacial, i tot això amb el suport d'eines SIG/GIS. També caldrà relacionar les dades obtingudes amb dades o informacions prèvies de la mateixa explotació o dades d'altri que poden aportar valor i completar les obtingudes inicialment. Finalment, caldrà visualitzar (mapar) la informació de manera que sigui comprensible i permeti la seva utilització en la tercera etapa: la presa de decisions.

L'Agricultura de Precisió persegueix un ús més eficient i sostenible dels recursos agrícoles a través del maneig de la variabilitat de les explotacions.

El fet d'incloure el terme precisió en aquesta estratègia agrícola no vol pas dir que l'agricultura tradicional no pugui ser precisa. Allò que es pretén a l'AP és subministrar a l'agricultor i als seus assessors tota la informació possible i les eines necessàries per tal que puguin prendre decisions localitzades específiques i al més documentades possible. En aquesta tercera etapa del cicle hi intervindran, per tant, sistemes de suport a la decisió (SSD/DSS), models agroeconòmics, tota la informació obtinguda en l'etapa anterior i, sobretot, el coneixement agronòmic específic sobre les parcel·les en qüestió i tota l'experiència acumulada de campanyes anteriors. El resultat d'aquesta etapa són les prescripcions d'operacions agrícoles de maneig que s'hauran de dur a terme a l'explotació.

La darrera etapa inclou totes les actuacions que cal dur a terme al camp per a executar les prescripcions establertes a la tercera etapa. Per a fer-ho, s'empraran els equips agrícoles, infraestructures, sistemes de posicionament i tecnologies vàries embarcades al tractor o als mateixos equips (tot i que també es pot fer AP amb equips convencionals). Una vegada realitzades les operacions, s'està en disposició de tornar a començar el cicle amb una mica més d'experiència.

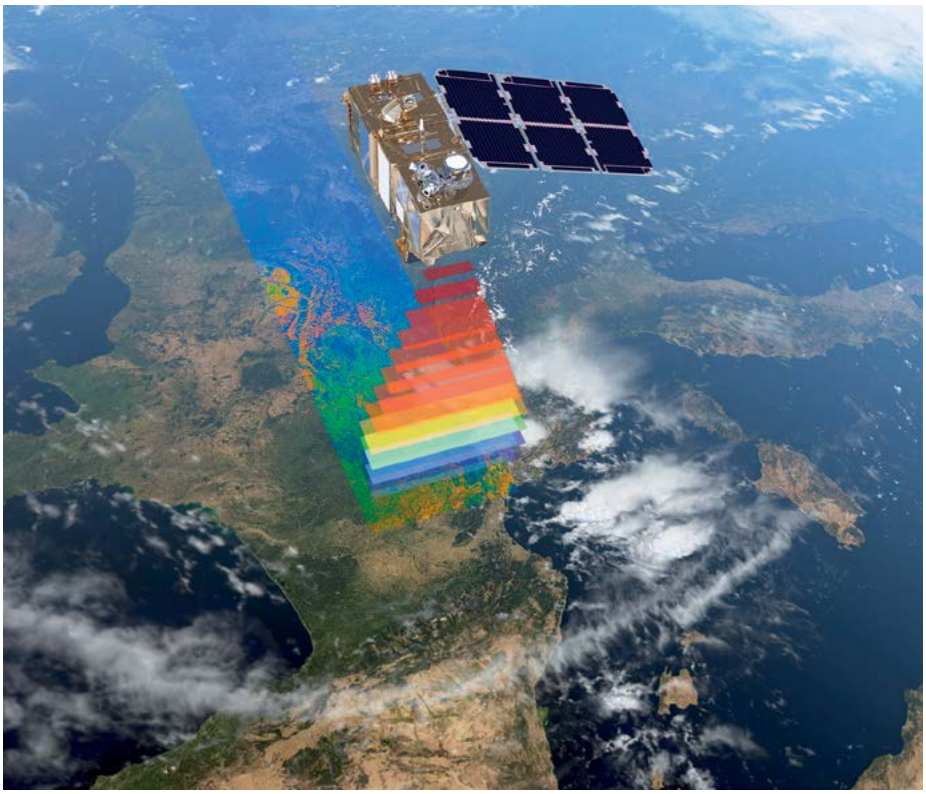


Figura 4. *Satèl·lit Sentinel-2 del programa europeu Copernicus, que proporciona imatges multiespectrals gratuïtes amb una resolució espacial entre 10 i 60 m i una resolució temporal de 5 dies. Amb les seves dades es pot estimar el vigor dels cultius de forma remota. Font: European Space Agency, ESA.*

04. Com es fa Agricultura de Precisió?

El concepte i la pràctica de l'AP són molt amplis, transversals i pluridisciplinaris. Tanmateix, en tots els casos, l'objectiu principal de l'AP és racionalitzar l'ús dels recursos agrícoles per a aconseguir una agricultura més eficient i sostenible. Per a explicar millor el concepte principal, es farà servir l'exemple de la fertilització d'un camp, que posteriorment es podrà extrapolar a moltes altres aplicacions. Des que la revolució industrial va arribar al camp, els fertilitzants s'han aplicat amb una dosi única i uniforme a tota la parcel·la. Es pot dir que, fins ara, la unitat de maneig ha estat la parcel·la, el camp o la plantació. Els agricultors més avançats fa uns anys ja han començat a utilitzar tecnologies per a fer aquestes aplicacions al més precises possible, mantenint les dosis ben constants i evitant solapaments innecessaris. Per a fer-ho, fan servir adobadores que s'adapten als canvis de velocitat del tractor o fins i tot als desnivells del terreny. També fan servir sistemes de guiatge basats en SSNG, mal anomenats GPS donat que el sistema GPS només és un dels quatre sistemes globals que actualment funcionen. Tanmateix, al contrari del que molts pensen, això no és exactament AP. La raó és que qualsevol agricultor sap que la collita dels seus camps no és perfectament uniforme al llarg i ample del seu camp, com tampoc no ho és entre les diferents campanyes. Tot i que, habitualment, el fertilitzant s'aplica de forma uniforme, la collita presenta més o menys variabilitat espacial i temporal. Aquesta discordança entre l'aplicació i la collita té dos conseqüències impor-

tants: 1) l'ús del fertilitzant és ineficient, tant des del punt de vista agronòmic com econòmic, i 2) quan es sobrefertilitzen zones poc productives es poden produir efectes adversos sobre el medi ambient. La veritable pràctica de l'AP en aquest cas seria aplicar més fertilitzant a les zones amb expectatives de producció més altes, i menys fertilitzant a les zones amb menor potencial productiu. Les adobadores més avançades certament poden contribuir a fer bones aplicacions, però la maquinària sola no acostuma a resoldre el problema.

Per a fer AP, el que cal és seguir tot el seu cicle (fig. 3). Així, en primer lloc caldrà obtenir dades del cultiu, del sòl i de tot el que hi pugui afectar. Aquestes dades, com per exemple el vigor del cultiu, es poden obtenir via teledetecció (sensors remots embarcats en drons, avionetes o satèl·lits, fig. 4), o bé amb sensors propers (portàtils o embarcats al tractor). També és possible realitzar observacions visuals de l'estat del cultiu. En tots els casos, però, caldrà georeferenciar les dades, és a dir, assignar-los coordenades absolutes, com les obtingudes a partir de receptors SSNG. Pel que fa al sòl, caldrà obtenir dades georeferenciades de la seva textura, humitat, nutrients, salinitat, etc., així com també del relleu de la seva superfície (fig. 5).

La variabilitat espaciotemporal dels camps pot comportar un ús ineficient dels recursos des del punt de vista agronòmic, ambiental i econòmic.

Posteriorment, en la segona etapa del cicle es processaran les dades i es representaran, sovint en forma de mapes digitals. En aquesta etapa, s'empren eines estadístiques i geoestadístiques que cal entendre i aplicar correctament. A partir de les dades obtingudes per teledetecció, s'acostumen a calcular índexs radiomètrics de vegetació. Al llarg dels darrers anys, els fisiòlegs vegetals han relacionat aquests índexs amb trets fisiològics de les plantes com, per exemple, la seva capacitat per fer la fotosíntesi, cosa que es relaciona amb el seu vigor. Un exemple clàssic és l'índex de vegetació de la diferència normalitzada, o NDVI, que es relaciona amb el vigor de les plantes, però que presenta algunes limitacions. Els investigadors han desenvolupat moltíssims índexs de vegetació, i cadascun es relaciona amb aspectes concrets de les plantes (vegeu www.indexdatabase.de). Una vegada mapades les dades, s'analitza la seva variabilitat espacial i com varia al llarg del temps (si es disposa de sèries temporals).

Un cop obtinguda tota aquesta informació mapada és l'hora d'interrelacionar-la. Aquest pas ens permetrà delimitar zones dins del camp que tinguin característiques similars i que puguin ser manejades de forma diferenciada. D'aquesta manera, la unitat de maneig deixa de ser el camp o la parcel·la, com fins ara, per a passar a ser una àrea més petita (la zona) i adaptada a les necessitats reals. Cal aclarir que el procediment per obtenir aquestes zones sol ser un mètode de classificació. A partir de les classes establertes (2 o 3, com a molt), la seva distribució espacial es pot traduir en diferents zones de maneig. A la figura 6 es mostren les dades recollides del cultiu (collita anterior i vigor en forma d'NDVI) i del sòl (conductivitat elèctrica aparent i relleu) en un camp de 100 ha d'ordi. Després de processar les dades, s'observa

Figura 5. *Sensor proper Veris 3100 que permet obtenir mesures georeferenciades de la conductivitat elèctrica aparent del sòl cada segon a dues profunditats (esquerra). Els punts de mesura obtinguts (dreta) cal interpolar-los amb processos geoestadístics per tal de representar-los en forma de mapa continu. Autor: Grup de Recerca en AgròTICa i Agricultura de Precisió, GRAP.*

que s'han establert 2 o 3 classes (categories), amb zones de més o menys superfície. Finalment, aquestes zones s'hauran d'adaptar a l'equipament disponible en cada explotació per tal de simplificar el maneig al màxim possible.

A la tercera etapa del cicle de l'AP cal prendre decisions sobre com fer les operacions de maneig necessàries. En el nostre exemple, la primera decisió serà si continuem aplicant el fertilitzant amb una dosi uniforme a tot el camp o bé si s'opta per una dosificació variable diferenciada per zones de maneig. Per a prendre aquesta decisió s'han d'analitzar els mapes obtinguts, però també els costos que se'n puguin derivar. Aquesta decisió serà específica per a cada situació. Cal conèixer el camp i els seus condicionants per a prendre decisions correctes. No es pot fer AP des d'una oficina, cal trepitjar el terreny. Igual que no es pot fer AP només amb tecnologia: cal incorporar-hi l'agronomia. Per exemple, un mateix color en un mapa pot tenir causes diferents i, per tant, necessitarà actuacions diferents.

Si es decideix fer una aplicació variable, el primer que haurà de fer l'agricultor o el tècnic assessor és adaptar les zones potencials de maneig a la seva realitat. És convenient simplificar les zones finals. En el cas de la figura 6, probablement ens quedaríem amb només dues zones de maneig i també caldria eliminar petites zones aïllades d'una classe dins de l'altra. A més, caldrà decidir les noves dosis de fertilitzant que s'aplicaran tot tenint en compte el vigor del cultiu a cada zona, l'extracció de la campanya anterior, el potencial productiu, etc.

Una vegada adaptat el mapa de zones de maneig i assignada una dosi a cada zona, només resta anar al camp i aplicar la prescripció. Això es pot fer amb una adobadora convencional sempre que la distribució espacial de les zones ho permeti. Si hi ha d'haver molts canvis de regulació per a adaptar la dosi al mapa de prescripció, tal vegada s'hagi de considerar utilitzar una adobadora que incorpori tecnologies de dosificació variable (TDV o VRT), ja sigui contractant una empresa de serveis especialitzada, ja sigui adquirint-la. Aquesta operació formaria part de la darrera etapa del cicle.

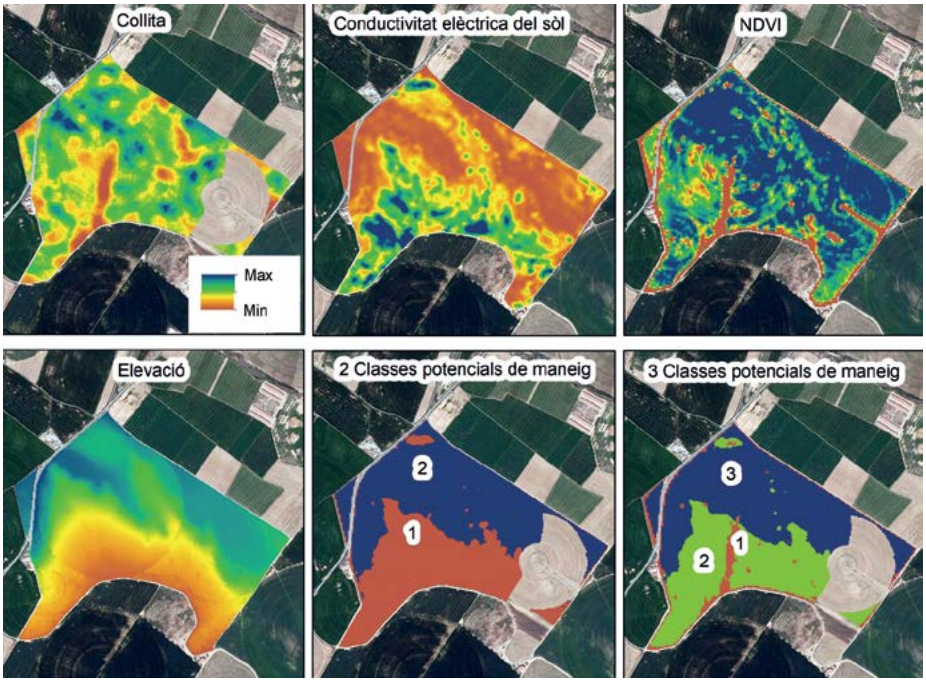


Figura 6. *Camp d'ordi de 100 ha on s'ha quantificat la collita de l'any anterior, la conductivitat elèctrica aparent del sòl, l'índex de vegetació NDVI i el model digital del terreny. A partir d'aquestes dades, es proposa un maneig del camp delimitant dos o tres classes potencials de maneig. Font: Grup de Recerca en AgròTICa i Agricultura de Precisió, GRAP.*

Si la variabilitat del camp ho justifica, amb l'AP, la unitat de maneig deixa de ser el camp i passa a ser la zona.

Tant si s'aplica un maneig uniforme com un de variable, si es disposa d'un mapa de collita és possible realitzar un mapa de benefici de la campanya. Per a fer-ho, el mapa de collita es pot convertir en un mapa d'ingressos multiplicant la producció de cada píxel (unitat mínima que forma la imatge del mapa de collita) pel preu unitari percebut i a cada píxel es restaran els costos de totes les operacions realitzades i dels recursos aplicats. Si el maneig és uniforme, els costos seran uniformes i, si el maneig és variable, serà necessari calcular les despeses específiques de cada zona. Aquestes despeses també poden incloure els serveis prestats per empreses de serveis d'AP quan siguin facturats per hectàrea. El resultat final és una mapa de benefici, com el de la figura 7. Els tècnics i agricultors probablement se sorprendrien dels resultats de les seves explotacions. Una cosa es percebre que als camps hi ha diferències, però una altra de molt diferent és quantificar-les. Fins i tot, es podria donar el cas que hi hagués zones d'un camp en què el balanç fos negatiu i hi hagués, per tant, pèrdues. Aplicant-hi criteris estrictament empresarials, aquelles zones deficitàries no valdria ni la pena treballar-les, però cal tenir en compte les implicacions agronòmiques que això podria comportar.

L'exemple utilitzat és només una de les possibles aplicacions de l'AP. Hi ha moltíssims casos susceptibles d'utilitzar-la. Cada cop més empreses inclouen serveis relacionats amb l'AP i cada

Cal conèixer els camps i els seus condicionants per a prendre decisions correctes. No es pot fer Agricultura de Precisió des de l'oficina!

vegada més es desenvolupen equips i aplicacions noves. Actualment, ja hi ha solucions per a la sembra variable, l'aplicació de productes fitosanitaris, el reg de precisió, estudis de drenatges, control de males herbes, etc. I tot i que hi ha moltes més aplicacions en cultius extensius, la fructicultura cada vegada rep més atenció i comença a gaudir de solucions específiques. Al Grup de Recerca en AgròTICa i Agricultura de Precisió de la Universitat de Lleida - Agrotecnio i també al Programa d'Ús Eficient de l'Aigua en Agricultura de l'IRTA fa temps que duem a terme recerca en fructicultura com la modelització 3D de plantacions amb sensors LiDAR o com l'ajust de les necessitats de reg a partir de dades de sensors propers i remots. En breu començarà un treball conjunt entre les dues institucions fusionant aquests dos temes. Cal remarcar que cada vegada van apareixent més empreses que ofereixen serveis d'assessorament que inclouen tècniques de l'Agricultura de Precisió. Com dèiem abans, la tecnologia ha d'anar acompanyada de l'agronomia per a que realment funcioni. Aquest primer número dedicat a l'Agricultura de Precisió està centrat en el Reg de Precisió. Més endavant s'aniran tractant altres aplicacions de l'Agricultura de Precisió.

05. Preguntes freqüents

L'AP només és viable en grans explotacions?

No té per què. És evident que l'atomització i la microparcel·lació no ajuden a rendibilitzar les inversions. Tanmateix, la viabilitat i la rendibilitat de l'Agricultura de Precisió dependrà del valor afegit del cultiu en qüestió i de la seva variabilitat. En determinats camps petits és possible trobar grans variacions en distàncies curtes. Si aquestes variacions permeten una aplicació diferenciada que comporti estalvis de recursos o millors eficiències productives, caldrà només fer balanç entre costos i beneficis.

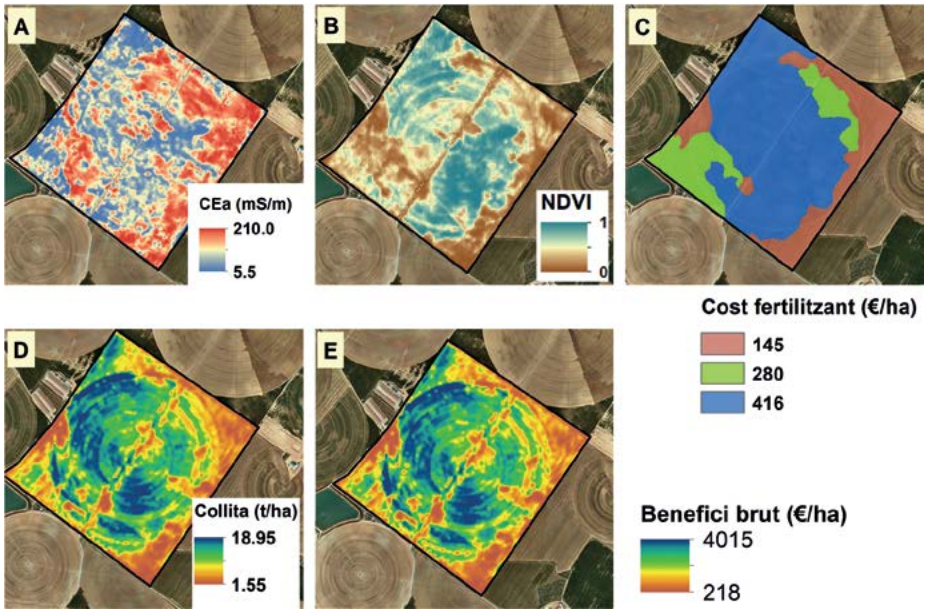


Figura 7. *Mapes de conductivitat elèctrica aparent del sòl (A) i de vigor del cultiu (B) que porten a proposar una fertilització variable (C). A partir del mapa de collita (D) i de tots els costos de la campanya, es pot generar un mapa de benefici (E) de la campanya. Font: Grup de Recerca en AgròTICa i Agricultura de Precisió GRAP.*

Qualsevol operació amb un receptor GPS/GNSS és AP?

No. Fer que un equip funcioni de manera precisa és molt bo, però no implica fer AP. El que realment indica si es fa o no AP és el fet de seguir les diferents etapes del cicle. Sempre que hi hagi adquisició de dades, processament, anàlisi de la variabilitat, presa de decisió i actuació podrem dir que fem Agricultura de Precisió.

Parlar d'AP és només parlar de tecnologia?

No necessàriament. És evident que la tecnologia ajuda i facilita les coses. Per exemple, qualsevol agricultor sap que els seus camps són variables, que hi ha zones més productives que d'altres, però quantificar aquesta variabilitat ja és una altra cosa. Un sensor proporciona dades objectives, repetibles i quantificables, i això a les persones ens costa més. També és cert que hi ha agricultors que volen tenir un equip en què es premi un botó i tot funcioni sol. Això implica un alt grau de tecnificació. Però no és menys cert que, si hi ha disponibilitat de mà d'obra i el seu cost és assumible, també es pot fer una Agricultura de Precisió basada en observacions visuals georeferenciades (amb un telèfon mòbil, per exemple) i actuacions manuals.

És rendible l'AP? O dit d'una altra manera, és car fer AP?

Depèn. Evidentment, cada cas és particular i caldria analitzar cada explotació per a respondre aquesta pregunta. L'AP es pot dur a terme adquirint els equips necessaris i esperant un estalvi de recursos o bé un increment dels beneficis obtinguts, derivats d'increments de la producció i/o de la qualitat dels productes obtinguts. En aquest cas, la inversió inicial serà elevada i el termini de recuperació dependrà de molts paràmetres. Hi ha casos en què aquesta solució es justifica fàcilment; en altres casos, la solució podria passar per contractar

els serveis d'empreses especialitzades que facturen per hectàrea i permeten una adopció gradual i acompanyada de l'AP. Un paràmetre que no entra mai a l'equació de càlcul de beneficis són els costos mediambientals. L'AP té una vocació sostenible i, per tant, pot tendir a reduir la contaminació del medi ambient a conseqüència de la distribució ineficient de recursos potencialment contaminants. La pràctica de l'AP podria, certament, reduir aquests costos i, si es tinguessin en compte, els terminis de recuperació de les inversions serien molt més curts.

Com començo a fer AP?

Es pot començar a fer AP a diferents nivells. Moltes vegades no és ni necessari tenir un receptor GNSS o una màquina molt sofisticada. Cada tipus de cultiu i cada sistema té les seves peculiaritats i caldria proposar un itinerari d'adopció específic per a cada cultiu i, fins i tot, per a cada agricultor. En termes generals, però, és important quantificar la variabilitat d'algun dels paràmetres més influents. En el cas dels cultius extensius, en què és relativament fàcil i econòmic aconseguir un mapa de collita, poder observar els diferents valors de producció però, sobretot, convertir-los en ingressos econòmics o en benefici, ajuda molt a fer-se una idea del potencial de l'AP en cada cas. En fructicultura, obtenir mapes de collita és molt costós, però en breu aniran apareixent sistemes d'estimació de la collita o sistemes de mapat de la producció. Mentrestant, una bona aproximació podria ser mesurar els arbres o fer mostrejos de la qualitat dels fruits i veure si hi ha diferències entre ells. Si fossin importants, es podria pensar en dur a terme alguna operació de forma variable, com l'aplicació de fitosanitaris o la fertirrigació.

Qui em pot assessorar per començar a fer AP?

Cal visitar els concessionaris i els distribuïdors locals de maquinària per fer-se una idea de quin és l'estat de l'AP a la nostra zona, però és important aconseguir altres fonts d'assessorament. L'assistència a jornades tècniques i demostracions és una altra possibilitat que cal tenir en compte, donada la informació pràctica que es pot obtenir i que ens pot ser molt útil per a la nostra explotació. Per altra banda, els agricultors tenen també a l'abast diferents empreses que, des de fa temps, han començat a donar servei i assessorament pel que fa a l'aplicació de les tecnologies de l'AP en diferents cultius en operacions com la sembra, la distribució de fertilitzants o l'aplicació de fitosanitaris. Altres agents importants en la difusió de l'AP són l'administració, les universitats i els centres de recerca. Darrerament, el Departament d'Agricultura, Ramaderia, Pesca i Alimentació està fent esforços interessants en donar a conèixer l'AP, per exemple a través d'aquest mateix Dossier i a través de Ruralcat. Els avenços de les universitats i dels centres de recerca també han d'acabar arribant al sector, donat que molta de la seva recerca es fa amb diners públics. En paral·lel a tot això, l'agricultor ha de poder discutir amb enginyers agrònoms i/o tècnics agrícoles sobre la gestió de les seves dades, l'oportunitat de l'AP, i les decisions agronòmiques més adequades en cada moment.

Per saber-ne més

Web del Grup de Recerca en AgròTICa i Agricultura de Precisió de la Universitat de Lleida – Centre Agrotecnio: www.grap.udl.cat/presentacio/que_fem.html

Web de RuralCat amb recursos d'Agricultura de Precisió: https://ruralcat.gencat.cat/web/guest/agricultura-de-precisio

Web de la Societat Internacional d'Agricultura de Precisió: www.ispag.org

Breu història de l'Agricultura de Precisió: https://www.ispag.org/about/History

Definició d'Agricultura de Precisió: https://www.ispag.org/about/definition

Autoria

Alexandre Escolà Agustí
Grup de Recerca en AgròTICa i Agricultura de Precisió
Departament d'Enginyeria Agroforestal. Universitat de Lleida – Agrotecnio Center
alex.escola@udl.cat

José Antonio Martínez Casasnovas
Grup de Recerca en AgròTICa i Agricultura de Precisió
Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl. Universitat de Lleida – Agrotecnio Center
joseantonio.martinez@udl.cat

Jaume Arnó Satorra
Grup de Recerca en AgròTICa i Agricultura de Precisió
Departament d'Enginyeria Agroforestal. Universitat de Lleida – Agrotecnio Center
jaume.arno@udl.cat

Jordi Llorens Calveras
Grup de Recerca en AgròTICa i Agricultura de Precisió
Departament d'Enginyeria Agroforestal. Universitat de Lleida – Agrotecnio Center
jordi.llorens@udl.cat

OPORTUNITATS DEL REG DE PRECISIÓ

Mesures d'humitat del sòl amb sonda de neutrons. Foto: IRTA.

01. Introducció: importància del reg i necessitat d'optimitzar-lo

L'aigua destinada al reg és un recurs limitat que convé gestionar de forma intel·ligent per tal de treure'n el màxim rendiment (agronòmic, econòmic, social, ambiental...) al mínim cost possible (econòmic i ambiental). En un escenari on la pluviometria és insuficient per cobrir la demanda hídrica dels conreus i assegurar una producció acceptable, la disponibilitat d'aigua de reg és una font de riquesa que permet la competitivitat del sector primari i la persistència d'activitat econòmica lligada al territori. Al mateix temps, l'aigua de reg té un cost directe lligat al manteniment i l'amortització d'infraestructures de captació d'aigua, emmagatzematge, distribució i bombament, entre d'altres, i indirecte associat als efectes negatius que una inadequada gestió del reg pot aportar (un excés de reg pot implicar sobrecostos en adobs, fitosanitaris o mà d'obra, com per exemple, la necessària per al control d'un excessiu creixement vegetatiu d'algunes plantacions). Una mala gestió hídrica dels cultius pot afectar la qualitat de la collita o l'estat fitosanitari d'aquests cultius. Ambientalment, un ús ineficient del reg pot arrossegar adobs i fitosanitaris cap al medi, reduint-ne l'eficiència a les explotacions i produint un efecte contaminant. Per a tot això, un reg eficient, que s'ajusti a la demanda dels cultius i que asseguri una bona producció i qualitat del producte, al mateix temps que sigui molt respectuós amb el medi, és totalment necessari i de ben segur que el consumidor final ho valorarà.

02. Complexitat de programar bé el reg

La programació del reg seria fàcil si les necessitats teòriques dels cultius fossin clares, l'aigua fos barata i abundant i no tinguéssim altres limitacions que interactuïn amb el reg. Però sovint, a la pràctica, les coses no són tan senzilles. D'una banda, no sempre estem segurs de les necessitats teòriques d'aigua dels cultius. És a dir, no sabem quanta aigua consumirien si no hi hagués cap factor limitant, i hem de ser conscients que el nombre de factors que interactuen amb el reg és elevat. Per exemple, l'estructura de la vegetació (dimensions físiques dels arbres, marcs de plantació, porositat de la coberta vegetal, sistemes de formació o fins i tot orientació de les files) afecten la quantitat de llum interceptada pels arbres i, en conseqüència, la seva capacitat de transpiració i de fer fotosíntesi (Girona *et al.*, 2011). La càrrega de fruits també té un efecte directe sobre la demanda d'aigua dels cultius, ja que s'ha comprovat que la eliminació de fruits redueix de forma clara i sostinguda el grau d'obertura dels estomes (Marsal et al., 2008) i que això es relaciona amb reduccions en la transpiració de l'arbre. Però quan les disponibilitats d'aigua són inferiors als requeriments o per d'altres raons es volen aplicar estratègies de Reg Deficitari Controlat (RDC), el seguiment fenològic dels cultius és important, ja que cal conèixer la sensibilitat estacional de cada cultiu a l'estrès hídric i en funció d'aquesta escollir el moment i intensitat idonis per reduir les quantitats d'aigua a aportar per sota de la demanda hídrica. En aquest sentit, nombrosos estudis han demostrat que l'adopció d'estratègies de RDC té un efecte directe en la millora de la qualitat dels fruits com, per exemple, en vinya (Girona *et al.* 2009) o presseguer (Girona 2002, Gelly *et al.*, 2004).

Moltes d'aquestes interaccions s'han estudiat abastament al llarg dels darrers anys, i aporten una gran bossa de coneixement agronòmic que ajuda a orientar la gestió del reg, a l'hora de com determinar i aplicar la quantitat d'aigua idònia en el moment i lloc adequats, tenint en compte tots els limitants comentats amb anterioritat a més de la pròpia variabilitat del sòl, que segueix sent un repte. Les parcel·les són variables i això fa que haguem de tractar-les com a tal, és a dir, si reguem de forma unitària una finca, existeix el risc de sobrerregar certes zones i estressar-ne d'altres. Per tant, a la hora de programar el reg, també hem de tenir en compte la capacitat d'emmagatzemament d'aigua del sòl, al mateix temps que disposar d'eines que ens aportin informació espai-temporal dels cultius i/o sòls i que ens ajudin a portar a terme un maneig del reg diferencial.

Tot aquest raonament és veu agreujat, i requereix encara més precisió en la gestió del reg quan es presenten condicions d'entorn desfavorables, com pot ser la utilització d'aigua de baixa o molt baixa qualitat o recursos hídrics molt limitats.

03. Noció de reg de precisió

Amb el concepte de Reg de Precisió ens referim a la capacitat d'ajustar el reg de manera molt fina a unes necessitats hídriques del cultius, les quals canvien al llarg del temps i també en l'espai, tant entre parcel·les com a dins mateix d'aquestes. Canvien en el temps perquè els cultius creixen (es desenvolupen vegetativament) i varien les condicions meteorològiques. També, la sensibilitat de les plantes a la disponibilitat d'aigua, o els efectes en la qualitat del producte, canvien en diferents fases del cicle vegetatiu. I a més, la disponibilitat d'altres fonts d'aigua, complementàries del reg, com és l'aigua de pluja emmagatzemada al sòl, canvien amb el temps. La variabilitat en l'espai prové en bona part de la variabilitat natural del sòl, sovint relacionada amb la topografia i amb la història prèvia de les parcel·les. La variabilitat del sòl s'acostuma a reflectir en el creixement vegetatiu (Bellvert *et al.* 2012), però la vegetació, també

Sequera. Foto: IRTA

Reg localitzat. Foto: IRTA

pot variar en l'espai per ella mateixa, segons el material vegetal, el disseny de les plantacions, la seva gestió agronòmica o el seu historial.

Partint de la definició d'Agricultura de Precisió que en fa la Societat Internacional d'Agricultura de Precisió (ISPA), i traslladant-ho a l'àmbit de la gestió hídrica dels conreus, podríem definir que el Reg de Precisió és una estratègia de gestió del reg que recull, processa i analitza dades temporals, espacials i individuals i les combina amb altres informacions per a donar suport a les decisions de maneig de reg d'acord amb la variabilitat estimada, i així millorar l'eficiència en l'ús de l'aigua, l'energia i altres recursos, la productivitat, la qualitat, la rendibilitat i la sostenibilitat de la producció agrícola. En aquests termes, el desenvolupament i l'ús d'eines integrades que ens permetin fer un reg de precisió és essencial per a poder maximitzar la productivitat de l'aigua de reg.

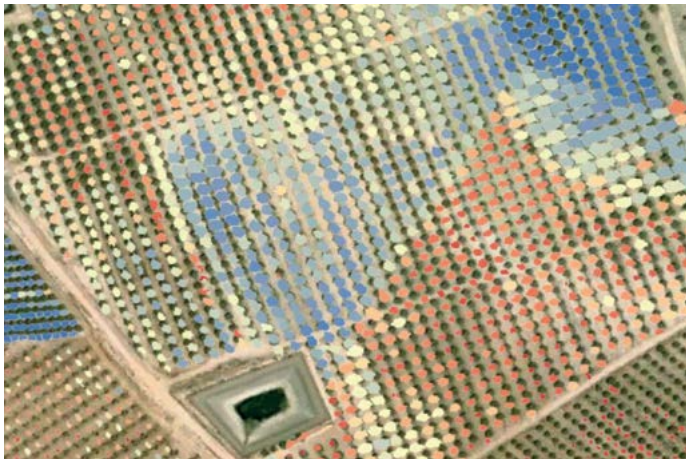
04. Tecnologies de suport al reg de precisió

Com hem comentat, un reg de precisió demana poder anar ajustant sobre la marxa el reg en funció de l'estat dels cultius i de les seves necessitats hídriques. Captar informació de com es troben els cultius, actualitzar l'estimació de les seves necessitats d'aigua i de quina part d'aquesta s'ha d'aportar pel reg, per finalment, aplicar-ho. Això es podria fer manualment, però duria molta feina. A la pràctica, sol ser molt més viable recolzar-se en tecnologies que ho facilitin. D'una banda, tecnologies que captin informació sobre l'evolució del cultiu i el seu entorn immediat, com poden ser els sensors d'humitat al sòl o sensors de planta (e.g. temperatura, flux de sàvia, turgència, etc.). El gran limitant d'aquest tipus de sensors, però, és que només mesuren una sola planta, o una porció molt limitada de sòl, i en base a la informació registrada es pren una decisió de reg per a tot el sector. Per això, integrar aquests valors dels sensors a models més complexos de gestió de l'aigua al sòl (Domínguez-Niño et al., 2020) o a aquells en què el sensor és un complement d'altres mesures (Casadesús et al., 2012) poden aportar solucions molt interessants. És evident que les necessitats hídriques i l'estat hídric dels cultius acostuma a variar espacialment dins les mateixes parcel·les, i un complement o alternativa als sensors

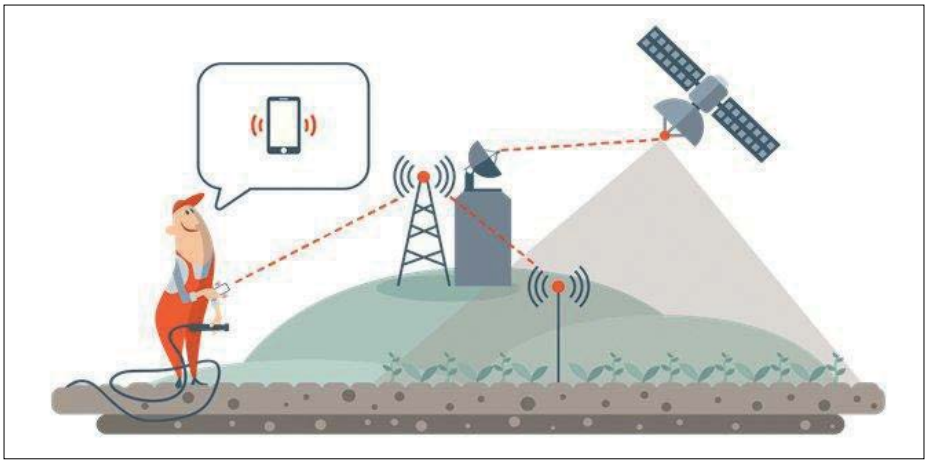
Mesura de la temperatura foliar com indicador de l'estat hídric dels cultius. Foto: IRTA.

Potencial hídric de tija amb càmera de pressió com a indicador de l'estat hídric dels cultius. Foto: IRTA.

Tubs instal.lats al sòl d'una plantació d'ametller per a mesurar l'humitat a diferents profunditats. Foto: IRTA.



Mapa de l'estat hídric a nivell d'arbre, adquirit amb imatge tèrmica aerotransportada. Foto: IRTA, IAS-CSIC.



Aplicació mòbil d'un sistema automatitzat de programació de reg. Foto: IRTA.

puntuals són les tècniques de teledetecció, les quals permeten obtenir informació espai-temporal de la parcel·la i no tan sols la porció sensoritzada. Totes aquestes dades requereixen algun tipus de processament per destriar-ne aquella informació que realment és rellevant i interpretar-la en termes de decidir com reajustar el reg. Els models de simulació dels cultius són molt útils per encaixar aquest tipus d'informació i recalcular els propers regs a aplicar. I finalment, aquesta informació ha de moure's d'un lloc a un altre. Contretament des del camp fins al mòbil o ordinador del regant, passant pel 'núvol', que és on s'acostuma a integrar i processar actualment les dades, i de nou al camp. Per això que les telecomunicacions i el tractament digital de les dades en són també una part indispensable.

05. Breu introducció a aquest *Dossier Tècnic*.

En aquest *Dossier* es fa un repàs als conceptes generals que hi ha al darrera del reg de precisió, i en general, del tractament digital del reg. Amb això volem apropar els regants a les oportunitats que van apareixent de poder practicar uns regs més precisos, més optimitzats, a les casuístiques de les seves explotacions, i de manera cada vegada més còmoda i accessible. També, mostrar que les tecnologies que hi ha pel darrere no són ni màgia ni caixes negres que no sabem ben bé què fan. Al llarg d'aquest *Dossier* trobareu diversos articles que exposen en què es basen, com funcionen i quines oportunitats d'ús ofereixen diferents avenços tecnològics al voltant del reg i de les relacions hídriques dels cultius. Són visions actualitzades de temes que estan evolucionant de manera ràpida. Parlem de tecnologies que en els propers anys poden acabar formant part de la caixa d'eines del regant.

Per saber-ne més

CASADESÚS, J.; MATA, M.; MARSAL, J.; GIRONA, J. (2012). "A general algorithm for automated scheduling of drip irrigation in tree crops". *Computers and Electronic in Agriculture* 83:11-20.

BELLVERT, J.; MARSAL, J.; MATA, M.; GIRONA, J. (2012). "Identifying irrigation zones across a 7.5-ha 'Pinot noir' vineyard based on the variability of vine water status and multispectral images". *Irrigation Science* 30:499-509

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". *Agriculturla Water Management* 228. DOI: 10.1016/j.agwat.2019.105880.

GIRONA, J. (2002). "Regulated deficit irrigation in peach: a global analysis". *Acta Hort* 592, 335-342.

GIRONA, J.; MARSAL, J.; MATA, M.; DEL CAMPO, J.; BASILE, B. (2009). "Phenological sensitivity of berry growth and composition of Tempranillo grapevines (Vitis vinifera L.) to water stress". *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 15, 268–277.

GIRONA, J.; DEL CAMPO, J.; MATA, M.; LÓPEZ, G.; MARSAL, J. (2011). "A comparative study of apple and pear tree water consumption measured with two weighing lysimeters". *Irrigation Science* 29:55-63.

GELLY, M.; RECASENS, I.; GIRONA, J.; MATA, M.; ARBONÈS, A.; RUFAT, J.; MARSAL, J. (2004). "Effects of stage II and postharvest deficit irrigation on peach quality during maturation and after cold storage". *Journal of the Science of Food and Agriculture* 84(6):561 – 568.

MARSAL, J.; MATA, M.; ARBONÈS, A.; DEL CAMPO, J.; GIRONA, J.; LÓPEZ, G., (2008). "Factors involved in alleviating water stress by partial crop removal in pear trees". *Tree Physiology* 28: 1375-1382.

Autoria

Joan Girona Gomis
IRTA Fruitcentre, Lleida
Programa Ús Eficient de l'Aigua en Agricultura.
joan.girona@irta.cat

Joaquim Bellvert Ríos
IRTA Fruitcentre, Lleida
Programa Ús Eficient de l'Aigua en Agricultura
joaquim.bellvert@irta.cat

Jaume Casadesús Brugués
IRTA Fruitcentre, Lleida
Cap del Programa Ús Eficient de l'Aigua en Agricultura.
jaume.casadesus@irta.cat

TELEDETECCIÓ APLICADA a l'agricultura i maneig del reg

Dron utilitzat per l'IRTA en el reg de precissió. Foto: IRTA

01. Què és la teledetecció?

"La teledetecció és l'art i la ciència d'adquirir informació d'objectes situats sobre la superfície terrestre sense tenir cap contacte físic amb aquests. Això es fa detectant i registrant l'energia reflectida i emesa mitjançant sensors". Principalment, hi ha dues tipologies de teledetecció: passiva i activa. La teledetecció passiva es caracteritza perquè els sensors mesuren la radiació solar reflectida o emesa per l'objecte estudiat (p. e., llum visible, infraroig reflectit o tèrmic), mentre que la teledetecció activa es basa en mesurar la radiació emesa pel sensor i que és reflectida per l'objecte (p. e., radar o lidar).

La radiació electromagnètica és una forma d'energia que es propaga a través d'ones que es desplacen per l'espai a la velocitat de la llum (300.000 km/s) transportant quantitats discretes d'energia. Aquestes ones es caracteritzen per longituds molt diferents, des de raigs X i gamma fins a ones de televisió i ràdio. El conjunt de totes les longituds d'ona s'anomena 'espectre electromagnètic'. Dins de l'espectre electromagnètic, s'hi distingeix una sèrie de regions en funció de les longituds d'ona, de les quals, les més utilitzades en agricultura són: llum visible, infraroig reflectit, infraroig tèrmic i radar.

02. Per què és útil la teledetecció en l'agricultura i en el maneig del reg?

En l'agricultura, la teledetecció s'està utilitzant per portar a terme una agricultura de precisió, ja que aporta informació espai-temporal de les parcel·les, i per tant ens permet caracteritzar-les millor per a poder fer un maneig diferencial dels *inputs* (aigua, fertilitzants i fitosanitaris).

Quant al maneig del reg, la teledetecció ens permet estimar els paràmetres biofísics de la vegetació, els quals estan relacionats, per exemple, amb el creixement vegetatiu (índex d'àrea foliar) i en conseqüència amb les diferències de demanda d'aigua dels cultius. A partir de relacions empíriques amb els coeficients de cultiu (Kc), és possible determinar l'evapotranspiració. Altres tècniques més avançades també permeten estimar directament l'evapotranspiració real i l'estat hídric dels cultius (vegeu article sobre evapotranspiració en aquest *Dossier*).

03. Plataformes i Sensors

S'entén per plataformes els satèl·lits, avions tripulats o no tripulats (drons) que transporten els sensors necessaris per captar, emmagatzemar i transmetre imatges a distància. Un sensor és el dispositiu que reuneix la tecnologia necessària per captar imatges a distància en diferents regions de l'espectre, i cadascuna d'aquestes regions es denomina 'banda'. Les diferents bandes es poden caracteritzar en funció de les variables següents: amplitud espectral (regió de l'espectre per la qual es capten les dades), resolució radiomètrica (nombre d'intervals d'intensitat que poden captar), resolució espacial (mida del píxel) i resolució temporal (interval de temps entre l'adquisició de cada imatge).

Els sensors més utilitzats en l'agricultura són:

- RGB (red-green-blue): s'utilitzen per a fotogrametria. Permeten la segmentació dels arbres i l'obtenció de paràmetres estructurals de la vegetació (alçada, volum, índex d'àrea foliar).
- Multiespectral: capten la llum en diferents bandes de l'espectre visible i infraroig proper. Normalment disposen de 4-12 bandes espectrals. A partir de la combinació de les diferents bandes, es poden calcular índexs espectrals de la vegetació, els quals estan relacionats, amb major o menor mesura, amb la quantitat de fulla o el contingut de clorofil·la.
- Hiperespectral: capten centenars de longituds d'ona d'alta resolució espectral dins i fora de l'espectre visible de forma contínua.
- Tèrmic: imatges tèrmiques en un rang espectral de 7,5–13 µm.
- LIDAR: sensor làser que permet crear una reconstrucció 3D dels cultius.
- Radar: radiòmetres de banda L o C, els quals poden utilitzar-se per estimacions d'humitat superficial del sòl (fins a 5 cm, aprox.).

04. Aplicacions amb satèl·lits

Entre la gran diversitat de satèl·lits que hi ha a l'espai, cal destacar aquells del programa Copernicus (https://www.copernicus.eu/es), liderat per la Comissió Europea (CE) i l'Agència Espacial

Plataformes		**Sensors**	**Resolució** (m)	**Freqüència** (nombre de dies)	**Productes per a agricultura i reg**
Satèl·lits	Sentinel-1	C-SAR (C-band Synthetic Aperture Radar)	5-20	6	Humitat superficial del sòl
	Sentinel-2	12 bandes al visible, infraroig	10-20	5	Índexs espectrals, paràmetres biofísics vegetació
	Sentinel-3	Radiòmetre tèrmic	1000	1	Temperatura terrestre
	Landsat-8	11 bandes al visible i infraroig	30-100	16	Índexs espectrals, paràmetres biofísics vegetació
	MODIS	36 bandes al visible, infraroig	250-1000	1-2	Índexs espectrals, paràmetres biofísics vegetació
	ECOSTRESS	Radiòmetre tèrmic	69x38	1	Temperatura terrestre
	Nanosatèl·lits (ex., Planet)	Visible i infraroig proper	0.5-5	1	Índexs espectrals vegetació
Avions		RGB, multiespectral, tèrmic, LIDAR	0.2-5	1	
Drons			0.05-1	1	

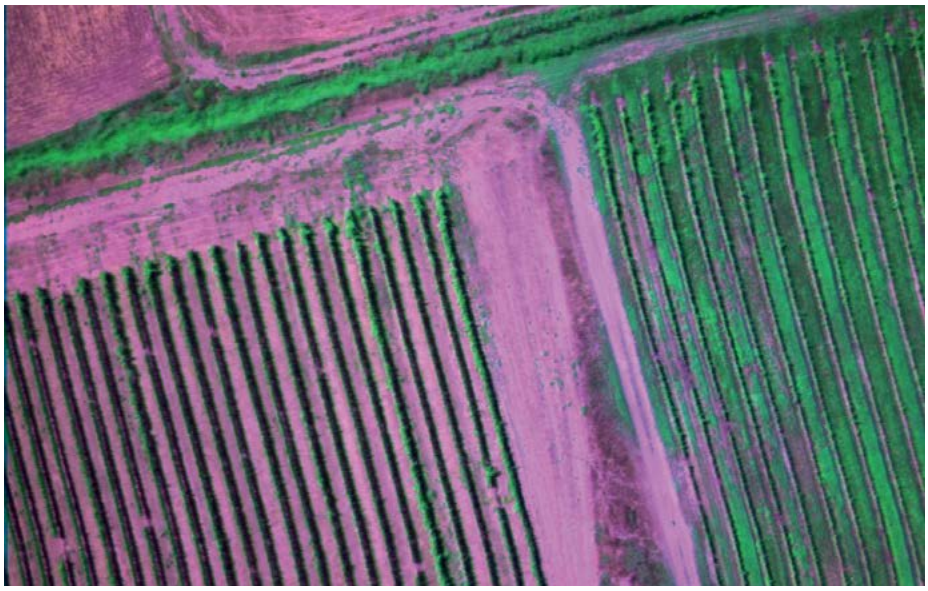
Taula 1. *Plataformes i sensors per a usos agrícoles. Font: elaboració pròpia.*

Europea (ESA), el qual té com a objectiu proporcionar informació precisa, actualitzada i de fàcil accés per millorar la gestió del medi ambient i entendre i mitigar els efectes del canvi climàtic. L'ESA ha desenvolupat diferents missions per atendre les necessitats del programa Copernicus (Sentinel-1 a Sentinel-5), des de monitorització de la superfície de la terra, estudis dels oceans, meteorologia o composició de l'atmosfera.

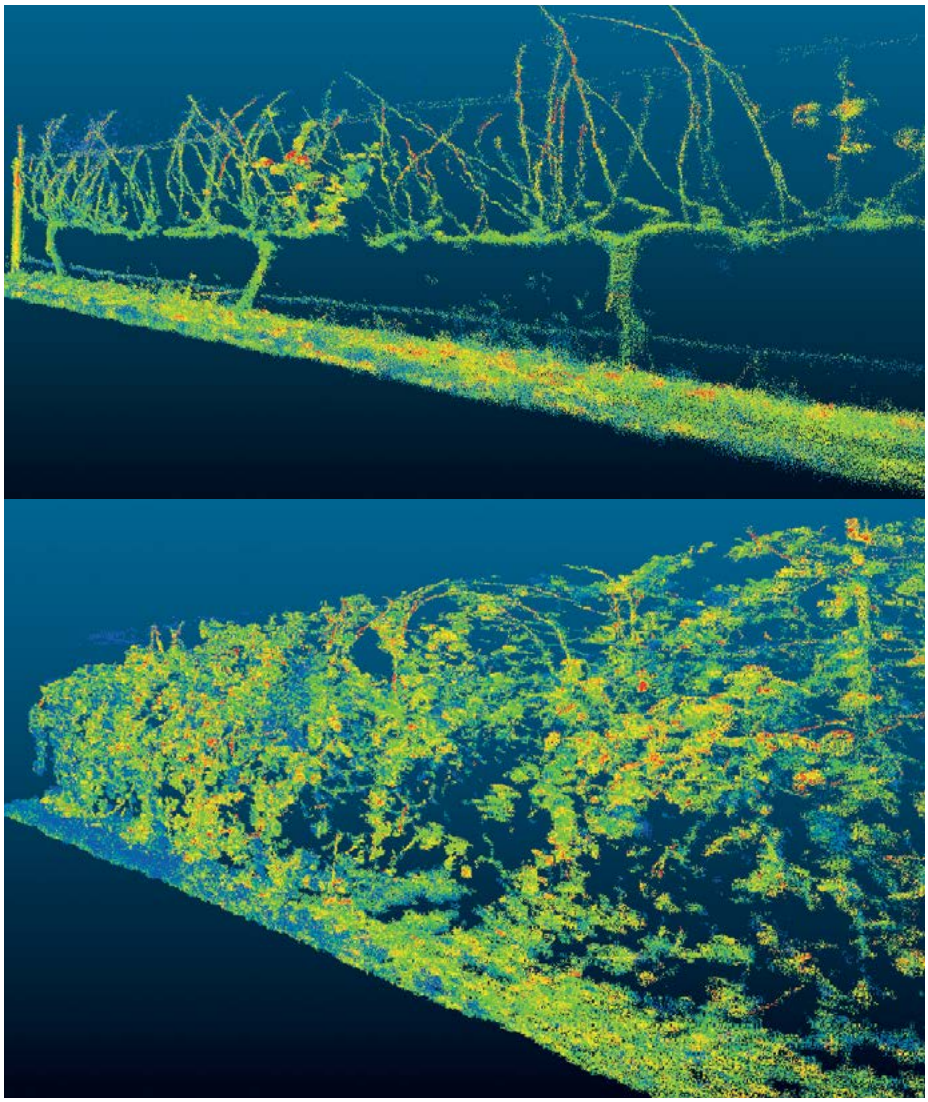
La taula 1 mostra una llista de diferents satèl·lits actualment utilitzats per a usos agrícoles. Cal destacar que els satèl·lits Sentinel-2 (A+B) aporten informació de les propietats biofísiques de la vegetació (p. e., desenvolupament vegetatiu, contingut de clorofil·la) cada 5 dies. Aquesta informació permet fer un seguiment espai-temporal del creixement vegetatiu i a través de relacions amb coeficients de cultiu (Kc) predir la demanda d'aigua. Per altra banda, els Sentinel-3 (A+B) proporcionen imatges de la temperatura terrestre diàriament. Estudis recents estan utilitzant imatges de Sentinel-1 per a usos agrícoles, ja que la banda C-SAR permet estimar la humitat superficial del sòl (fins a 5 cm) i, al ser transparent als núvols, permetria cobrir aquells 'gaps' que deixen els altres satèl·lits amb bandes a l'espectre visible o tèrmic. Malgrat que hi ha una potencialitat en l'agricultura, les actuals limitacions relacionades amb la poca penetració al sòl o el 'soroll' que diferents tipus de vegetació fan sobre el senyal radar, a dia d'avui, encara no se n'ha demostrat la viabilitat per al maneig del reg.

04.01 Aplicacions amb imatges multiespectrals aerotransportades

Hi ha situacions en què la resolució espacial de les imatges de satèl·lit no és suficient per a determinar certs paràmetres de la vegetació. Per exemple, en el cas de cultius llenyosos, les imatges de Sentinel-2, amb una mida de píxel mínima de 10 metres, ens aporten imatges en què cada píxel



Exemple d'una imatge multiespectral d'alta resolució on es poden apreciar els efectes de la coberta vegetal sobre el sòl en una vinya en espatllera. Per poder apreciar les diferències en el cultiu, cal tenir una alta resolució espacial que permeti seleccionar exclusivament el senyal del cultiu i eliminar el sòl, l'ombra i la coberta. Font: Siebers et al., 2018.



Reconstrucció 3D d'una vinya en espatllera utilitzant LiDAR. Font: Siebers et al., 2018.

representa informació barrejada del cultiu, sòl nu i/o coberta vegetal entre fileres. Això provoca que sigui molt complex extreure informació precisa de l'estat real del cultiu. L'ús de càmeres multiespectrals a bord d'avions o drons permet obtenir imatges d'alta resolució, les quals permeten identificar arbres individuals, i mitjançant l'aplicació d'algoritmes de processat d'imatges, extreure'n la informació espectral del cultiu, evitant el sòl o la coberta vegetal.

Un altre aspecte molt rellevant és la resolució temporal. En el cas d'imatges de satèl·lit, la freqüència amb la qual podem obtenir noves imatges dependrà de l'òrbita i la configuració del satèl·lit. Això suposa un problema si, per exemple, el dia que Sentinel-2 o Landsat-8 sobrepassen per la nostra zona d'interès i està ennuvolat. Si bé els nous nanosatèl·lits permeten freqüències gairebé diàries, o programades, el nombre i la diversitat de bandes espectrals que tenen encara és limitat, i a més el preu de sol·licitar imatges de nanosatèl·lits de forma reiterada pot arribar a ser prohibitiu.

De la mateixa manera que amb imatges de satèl·lit, els sensors multiespectrals permeten obtenir imatges amb múltiples bandes de l'espectre de la llum que ens possibiliten el càlcul d'índexs espectrals relacionats amb l'estat nutricional del cultiu, el seu creixement o l'estat fisiològic. En el cas més simple, tenim càmeres RGB, que simulen la percepció humana dels colors. Com el nom indica, registren tres bandes en l'espectre visible, les quals permeten realitzar una interpretació visual de les imatges. També existeix la possibilitat de calcular índexs de vegetació a partir d'aquestes tres bandes, ja que, en el cas del roig, és on es produeix la major absorció de llum per part de la clorofil·la i, per tant, es podrien relacionar amb l'estat del cultiu. No obstant això, per al càlcul d'índexs de vegetació ben establerts, com el NDVI, és necessari comptar amb alguna banda en l'infraroig proper (NIR). Les càmeres/sensors que normalment incorporen alguna banda en el NIR les anomenem 'multiespectrals'.

Exemples d'aplicacions per al maneig del reg:

- *Detecció de canvis de vigor vegetatiu.* Quan es detecta una disminució del creixement vegetatiu i el rendiment és perquè el cultiu ha estat sotmès a llargs períodes i intensitats d'estrès hídric. Per això, malgrat que l'índex NDVI es promociona com a eina per a la 'detecció de l'estrès hídric', cal tenir en compte que allò que identifica és un efecte indirecte sobre la vegetació causat per l'estrès hídric.
- *Indicadors d'estrès fisiològic.* Existeixen determinats índexs de vegetació que permeten determinar canvis fisiològics que es produeixen en la vegetació com a conseqüència d'un estrès hídric. Un d'aquests índexs és el PRI *(Photochemical Reflectance Index),* que normalment utilitza les bandes de 530 i 570 nm. Aquesta regió de l'espectre és sensible a canvis en les xantofil·les, un pigment que juga un paper molt important en la protecció de les plantes enfront a un excés de radiació, sobretot en situacions d'estrès on la planta no és capaç de processar, mitjançant la fotosíntesi, tota la llum que li arriba. Nombrosos estudis han relacionat els canvis d'aquest índex amb situacions d'estrès fisiològic que passen abans que es manifestin altres canvis en el cultiu com una disminució del creixement vegetatiu o rendiment (Suárez *et al*., 2009). Es tracta, però, d'un senyal molt petit que a més està influenciat per l'arquitectura de la planta o el contingut de clorofil·la. Per tant, la interpretació d'aquest índex no és senzilla.
- *Determinació de coeficients de cultiu.* A l'igual que amb les imatges de satèl·lit, les imatges obtingudes mitjançant vehicles aeris (tripulats o no), permeten obtenir índexs de vegetació o mapes de percentatge de coberta vegetal, els quals es relacionen amb els coeficients de cultiu (K^c).

04.02 Aplicacions amb imatges hiperespectrals aerotransportades

De la mateixa manera que la resolució espacial pot ser un factor limitant en l'aplicació de certes tècniques de teledetecció, la resolució espectral també hi té un paper determinant. Si bé amb els satèl·lits i les càmeres multiespectrals s'observen regions de l'espectre concretes (bandes multiespectrals), a través de sensors hiperespectrals existeix la possibilitat d'obtenir una informació espectral contínua de tot l'espectre. El grau de detall de l'espectre i el rang espectral permet quantificar aquelles zones espectrals en les quals es produeix una absorció degut a la presència dels compostos químics que ens interessen.

Malgrat l'interès científic en l'ús de tècniques espectromètriques a nivell d'imatge, la seva utilització de forma pràctica segueix sent limitada principalment degut a tres motius: a) el preu dels sensors hiperespectrals és elevat, sobretot per aquells sensors que inclouen regions de l'espectre per sobre de 1.000 nm; b) el volum de dades que generen aquests sensors és enorme (de l'ordre de varia Gb/segon), que suposa una limitació a l'hora de processar aquestes dades de forma ràpida i eficaç; c) malgrat la reducció en la mida dels sensors més avançats, segueixen sent relativament pesats i per tant, necessiten ser aerotransportats per avions tripulats o drons grans, la qual cosa qual fa augmentar el cost de l'operació. No obstant això, en els darrers anys estem veient com el desenvolupament de noves tècniques de processat de dades (aprenentatge automàtic o *Machine Learning*) i l'augment de la potència de càlcul estan tenint un impacte significatiu en la capacitat de processat d'aquestes dades.

Exemples d'aplicacions:

- *Detecció de malalties.* Una de las aplicacions més rellevants de la teledetecció hiperespectral és la detecció de símptomes provocats per malalties. El gran nombre de bandes espectrals d'aquest tipus de càmeres permet detectar els petits canvis fisiològics que es produeixen en el cultiu com a conseqüència de la presència de la malaltia (Zarco-Tejada *et al*., 2018).
- *Qualitat del fruit i maduresa*. L'ús de càmeres hiperespectrals ha estat relativament comú en aplicacions industrials com el control de qualitat en cadenes de producció o la classificació de materials, detecció de maduresa o danys dels fruits. Recentment s'estan començant a desenvolupar aplicacions basades en l'ús de càmeres hiperespectrals instal·lades en plataformes terrestres, les quals permeten estimar paràmetres de maduresa i qualitat en fruits com per exemple, en mangos o maduixes (Wendel *et al*., 2018; Gao *et al*., 2020).

04.03 Aplicacions tèrmiques

Els sensors tèrmics s'utilitzen per detectar l'estat hídric i evapotranspiració dels cultius, ja sigui a través d'índexs d'estrès hídric o mitjançant models de balanç energètic. En aquest dossier s'exposen diferents articles on es demostra la potencialitat i necessitat de l'ús de la teledetecció tèrmica per a estimar les necessitats hídriques dels cultius i com a eina de maneig del reg.

04.04 Aplicacions amb fotogrametria

Actualment, l'ús de càmeres d'alta resolució i la baixa altura a la qual és possible volar amb drons permet obtenir imatges de molt alta resolució (1-2 cm). L'ús de tècniques fotogramètriques permet combinar múltiples imatges adquirides des de diferents posicions del vol i obtenir informació relacionada amb l'estructura de la vegetació, com ara l'altura dels arbres o el volum de capçada a través de reconstruccions en 3D.

Exemples d'aplicacions:

- *Generació de models del terreny d'alta precisió*. Si bé aquesta aplicació no està directament relacionada amb el cultiu, l'obtenció de mapes d'elevació amb alta precisió és essencial per a un correcte disseny hidràulic del sistema de reg.
- *Obtenció de volums de capçades.* Les necessitats hídriques dels cultius llenyosos estaran imposades pel volum total de la capçada dels arbres. Una estimació precisa del volum efectiu del cultiu permetrà obtenir uns coeficients de cultiu molt més adaptats a la realitat de la plantació i, per tant, calcular de forma més precisa les necessitats hídriques.
- *Obtenció de l'altura del cultiu en assajos de varietats.* Algunes altres aplicacions rellevants en l'agricultura poden ser les que s'utilitzen en les millores de varietats, sobretot en cultius herbacis, per a l'obtenció de paràmetres d'interès d'una forma molt més ràpida que les mesures manuals tradicionals. Un exemple és la mesura de l'alçada de les plantes: [https://www.youtube.com/watch?-v=kJGeMezXgpc]

04.05 Aplicacions de LiDAR

Malgrat els avenços que s'han produït en el camp de la fotogrametria i la capacitat de generació de models 3D a partir de múltiples imatges d'alta resolució, aquesta metodologia té limitacions per a arquitectures de vegetació complexes i denses, situacions de poca il·luminació, etc. El LiDAR *(Light Detection and Ranging)* utilitza un raig làser per a determinar la distància del sensor a l'objecte amb alta precisió en nombrosos punts, el qual permet anat creant un núvol de punts en 3D que defineixen l'estructura de l'objecte. La principal aplicació del LiDAR en agricultura és per a l'estimació dels paràmetres relacionats amb l'estructura del cultiu: altura, volum, arquitectura. A diferència dels mètodes fotogramètrics, els quals normalment utilitzen imatges zenitals, els sensors LiDAR poden ser operats tan des de plataformes aèries com des de plataformes terrestres, incloent-hi tractors i robots. Això té un avantatge molt important, ja que permeten caracteritzar molt millor l'arquitectura i les formes de les capçades dels arbres.

En el cas dels models 3D obtinguts per fotogrametria, només podem obtenir informació sobre la part superior de les capçades, perquè els arbres s'assemblen a 'piràmides'. El LiDAR, per la seva naturalesa activa, permet penetrar dins de la coberta vegetativa i arribar fins al sòl, creant una reconstrucció més precisa de l'arquitectura de la planta. En el cas de sensors a bord de vehicles terrestres, aquests reconstrucció és fins i tot més precisa, ja que la visió lateral permet obtenir un major detall de la distribució de les fulles i les tiges.

Exemples d'aplicacions:

- *Dosificació òptima d'agroquímics.* Algunes de les aplicacions recentment publicades inclouen l'estimació de volums de capçada per a calcular el volum necessari de pesticides o fertilitzants per a cada arbre de forma individualitzada. Mitjançant el LiDAR muntat en el tractor, s'estima el volum de la capçada de l'arbre i es calcula l'aplicació òptima a realitzar per part del nebulitzador.
- *Optimització de volum de reg.* De la mateixa manera que en aplicacions fotogramètriques, l'ús d'informació sobre el volum de la capçada dels arbres podria permetre estimar les necessitats hídriques de cada arbre.

05. Perspectives i futurs desenvolupaments

En els darrers anys, hem vist com el desenvolupament de noves plataformes com els drons o vehicles aeris no tripulats (UAV) han tingut un creixement exponencial i han demostrat la seva potencialitat per a proporcionar informació espacial de les parcel·les, la qual, conjuntament amb el suport de mesures agronòmiques, han permès

Índexs de vegetació simples, com el NDVI, són interessants per a detectar canvis en el vigor vegetatiu dels cultius però, en el cas del maneig de reg, són incapaços de quantificar l'aigua evapotranspirada o l'estrès hídric dels cultius.

prendre decisions intel·ligents i maximitzar la rendibilitat de les parcel·les. Una altra àrea de la teledetecció que ha tingut un gran impacte en l'agricultura, probablement major que la introducció dels drons, ha estat el llançament del programa Copernicus i els satèl·lits Sentinel, sobretot els dos Sentinel-2, els quals permeten obtenir informació cada 5 dies a una resolució màxima de 10 metres. Moltes de les empreses que inicialment van començar oferint serveis de vols amb drons, ara han passat a oferir serveis combinats i aprofiten l'alta freqüència de les imatges de satèl·lit d'accés lliure complementant-t'ho amb imatges d'alta resolució obtingudes amb drons. No obstant això, la majoria d'aplicacions de teledetecció comercialitzades avui en dia segueixen basant-se amb índexs de vegetació simples, com el NDVI, els quals són interessants per a detectar canvis en el vigor vegetatiu dels cultius, però que, en el cas del maneig de reg, són incapaços de quantificar l'aigua evapotranspirada o l'estrès hídric dels cultius. En aquest sentit, l'ús de la termografia és imprescindible.

El desenvolupament de noves tecnologies cada vegada més assequibles, com les càmeres hiperespectrals, unit a l'augment de la potència de càlcul i desenvolupament de nous algoritmes de processat massiu de dades, podria suposar una revolució en el desenvolupament de noves aplicacions i formes de detecció de l'estrès hídric. Per altra banda, el desenvolupament de tecnologies de sensors terrestres també serà molt rellevant, ja que aquests poden complementar-se amb les dades adquirides amb satèl·lits i drons. La revolució en l'àmbit de l'internet de les coses (*Internet of Things,* IoT) permetrà obtenir informació en temps real sobre les propietats biofísiques dels cultius i de l'ambient (dades climàtiques, humitat del sòl, estat del sistema de reg, etc.). L'assimilació de dades espai-temporals dins de models de cultiu serà clau per a una pressa de decisions òptima en aplicacions com el maneig del reg, ja que, a més de disposar d'informació de prediccions de demanda d'aigua per a una campanya sencera, és necessari obtenir inputs de les necessitats hídriques en temps real i de forma precisa, perquè una decisió mal presa pot suposar un deteriorament en la producció o la qualitat del fruit.

Per saber-ne més

SUÁREZ, L., ZARCO-TEJADA, P.J., BERNI, J.A.J., GONZÁLEZ-DUGO, V., FERERES, E. (2009). "Modelling PRI for water stress detection using radiative transfer models". *Remote Sensing of Environment* 113, 730–744.

ZARCO-TEJADA, P. J., CAMINO, C., BECK, P. S. A., CALDERON, R., HORNERO, A., HERNÁNDEZ-CLEMENTE, R., ET AL. (2018). "Previsual symptoms of Xylella fastidiosa infection revealed in spectral plant-trait alterations". *Nat Plants* 4, 432–439. doi:10.1038/s41477-018-0189-7.

WENDEL, A., UNDERWOOD, J., AND WALSH, K. (2018). "Maturity estimation of mangoes using hyperspectral imaging from a ground based mobile platform". *Comput. Electron. Agric.* Available at: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169918309013.

GAO, Z., SHAO, Y., XUAN, G., WANG, Y., LIU, Y., AND HAN, X. (2020). "Real-time hyperspectral imaging for the in-field estimation of strawberry ripeness with deep learning". *Artificial Intelligence in Agriculture* 4, 31–38. doi:10.1016/j.aiia.2020.04.003.

SIEBERS, M. H., EDWARDS, E. J., JIMENEZ-BERNI, J. A., THOMAS, M. R., SALIM, M., AND WALKER, R. R. (2018). "Fast Phenomics in Vineyards: Development of GRover, the Grapevine Rover, and LiDAR for Assessing Grapevine Traits in the Field". *Sensors* 18. doi:10.3390/s18092924.

Autoria:

José Antonio Jiménez-Berni
Instituto de Agricultura Sostenible (IAS-CSIC), Córdoba.
berni@ias.csic.es

Joaquim Bellvert Ríos
IRTA Fruitcentre, Lleida
Programa Ús Eficient de l'Aigua en Agricultura
joaquim.bellvert@irta.cat

ESTIMACIÓ DE L'EVAPOTRANSPIRACIÓ amb satèl·lits

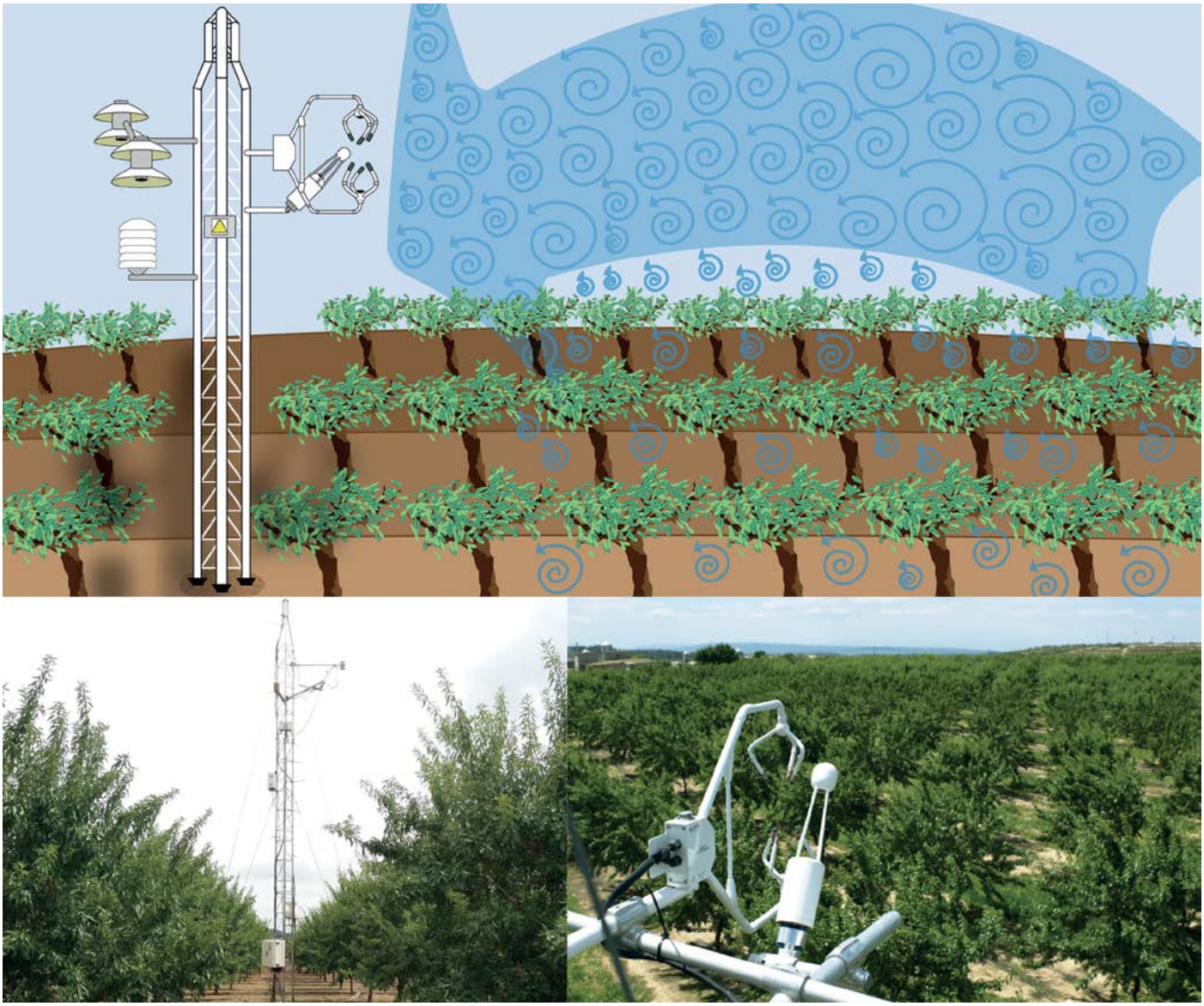


Figura 1. *Sistema Eddy-covariance, representació dels fluxos turbulents captats per l'anemòmetre sònic i l'analitzador de gasos d'alta freqüència. Foto: IRTA.*

01. Evapotranspiració

L'evapotranspiració (ET) és un fenomen que sorgeix del transport de l'aigua en el sòl cap a l'atmosfera. Aquest és el resultat de la suma de l'evaporació de la capa superficial del sòl (E) i la transpiració de la vegetació (T). Encara que l'ET és utilitzada freqüentment com un indicador de la demanda del cultiu, realment està més relacionada només amb la part de la transpiració, ja que aquesta última està estretament lligada a la productivitat de la planta, mentre que l'evaporació del sòl acostuma a considerar-se des d'un punt de vista agronòmic, com una part no beneficiosa.

Convé diferenciar diferents conceptes al voltant de l'ET. En primer lloc, l'evapotranspiració real és la que considera tots els factors ambientals, i correspon al consum real de l'aigua emmagatzemada al sòl. L'ET potencial, en canvi, és l'ET teòrica que podria tenir un cultiu amb les condicions actuals, tant meteorològicament com de vigor vegetal,

quan la humitat del sòl no és un factor limitant. Per últim, hi ha l'ET de referència que bàsicament és una ET potencial per a un cultiu de referència, generalment una capa de gespa o alfals, amb una cobertura total del sòl i ben regada.

El mètode tradicionalment més utilitzat per a estimar l'evapotranspiració potencial d'un cultiu i per a conèixer la demanda hídrica en cada etapa de creixement, és multiplicar l'ET de referència per un coeficient de cultiu (Kc) (FAO 56 (Allen *et al*. 1998)). Aquest coeficient és específic per a cada etapa de creixement i el seu valor en zones mediterrànies pot oscil·lar des de valors molt propers a 0 fins a 1,2. Tot i això, tal i com es comentarà més endavant, l'ús de coeficients de cultiu pot ser que no sigui l'alternativa més fiable per a determinar les necessitats d'aigua en un cultiu.

Per altra banda, l'ET és difícil de mesurar, ja que és un fenomen que apareix en un règim turbulent. Una de les formes de mesurar l'ET és utilitzant un lisímetre de pes, que és capaç de pesar l'aigua en un espai radicular abans i després d'un esdeveniment de reg. Un altre mètode són les torres de flux (*Eddy-covariance*) que mesures dades micrometerològiques d'alta freqüència (velocitat del vent, temperatura i concentracions de vapor d'aigua, i altres gasos) i són capaces de calcular l'ET i/o el balanç del carboni (fig 1). Aquestes torres són d'especial importància per a validar models d'estimació d'ET, ja que estimen directament els fluxos d'energia i aigua sense modificar gairebé l'entorn ni les condicions del sòl.

02. Evapotranspiració i energia

És possible comptabilitzar l'ET com un residu del balanç d'aigua, on les entrades corresponents a reg i precipitació (P) i les sortides a drenatge (D), escorrentia (R), emmagatzematge en l'espai radicular (ΔS) i ET. Estimar l'ET mitjançant aquest mètode té l'inconvenient que no sempre se sap la quantitat d'aigua d'entrada ni les propietats hidràuliques del sòl. (Eq. 1).

$$ET = P + I - D - R - \Delta S$$

Equació 1

També és possible comptabilitzar l'ET en termes d'energia, donat que el procés que converteix l'aigua líquida del sòl en vapor a l'atmosfera requereix d'energia per a canviar de fase. En aquest balanç d'energia es té d'entrada la radiació neta (Rn) i de sortida l'ET o el flux de calor latent (LE), el flux de calor sensible (H) i el flux de calor emmagatzemat en el sòl (G) (Eq. 2).

$$R_n = LE + H + G$$

Equació 2

La radiació neta és el component principal en aquest balanç i té una gran influència en zones i cultius on l'aigua no és un factor irritant, així com a l'hora d'estimar l'ET potencial. Rn depèn no solament de la irradiància solar, sinó que és necessari conèixer certs paràmetres estructurals i biofísics de la vegetació, tal i com l'índex de l'àrea foliar o l'albedo, entre altres. Tot i així, sota condicions d'estrès hídric, gran part d'aquesta energia (Rn) és dissipada en forma de calor (H), reduint-se per tant l'ET dins d'aquest balanç energètic. Aquest flux de calor sensible és el paràmetre més difícil del model ja que correspon al transport de calor entre el sòl, la planta i l'atmosfera. Aquest passa de forma turbulenta provocat per l'acció del vent al interactuar amb la vegetació i altres obstacles de la superfície. Tant la Rn com les característiques aerodinàmiques que influeixen en el transport de calor (H) i el valor d'aigua (LE) estan molt influenciats per l'estructura del cultiu, dins de processos complexes i en molts casos no lineals, que poden fer que l'ús de l'ET de referència i Kc sigui desaconsellable. Aquest és el cas de cultius llenyosos i/o formacions en filera o en un marc de plantació, en els quals la transmissió de radiació i el transport de calor ocorren de forma molt diferent als cultius típics utilitzats en el càlcul de l'ET de referència (alfals o gespa).

03. Estimació de l'ET amb satèl·lits

En molts casos s'han utilitzat relacions lineals entre el NDVI i altres índexs espectrals, indicadors del vigor vegetal, per estimar el Kcb, la qual cosa permet calcular l'ET del cultiu utilitzant l'ET de referència. Tot i així, aquest mètode avalua l'ET potencial, presentant dificultats en estimar correctament l'ET real en condicions d'estrès hídric.

Altres mètodes per a estimar utilitzen també índexs espectrals, dades d'humitat del sòl utilitzant satèl·lits amb sensors de microones, encara que la capacitat de penetració en el sòl de les ones microones és molt limitada i per tant només ofereixen informació relativa al contingut de l'aigua en la zona superficial del sòl.

L'ús de models de balanç d'energia té l'avantatge que la majoria de paràmetres es poden obtenir utilitzant tècniques de teledetecció combinades amb dades meteorològiques. Els mètodes de balanç d'energia es poden dividir entre els d'una font i de dues fonts. Els models d'una font com el METRIC (*Mapping Evapotranspiration at high Resolution with Internalized Calibration* Allen *et al*., 2007) tenen l'avantatge de ser més senzills, ja que consideren la vegetació i el sòl com un conjunt i requereixen menys parametrització. A més a més, el model METRIC utilitza valors extrems d'ET dins de la imatge per a autocalibrar-se, un píxel "calent", en què l'ET hauria de ser propera a zero, i un píxel "fred" on l'ET seria màxima. Aquesta autocalibració fa necessari que sempre existeixin condicions extremes dins de la imatge. Els models de dues fonts, en canvi, consideren la vegetació i el sòl

com a dos components diferents i en la majoria de les seves variants no utilitzen autocalibració, cosa que els fa més robusts.

Un dels principals problemes per a estimar els fluxos d'energia des de l'espai és la carència d'un satèl·lit en l'espectre tèrmic amb suficient temps de revisita i resolució espacial. És per això que s'han desenvolupat mètodes per augmentar la resolució espacial d'imatges tèrmiques utilitzant la relació existent entre les dades tèrmiques de baixa resolució i les multiespectrals d'alta resolució i després aplicar-hi tècniques d'aprenentatge automàtic (Gao *et al*., 2012; Guzinski & Nieto, 2019).

El programa Copernicus és el Programa d'Observació de la Terra de la Unió Europea que ofereix serveis gratuïts d'informació basats en dades d'observació de la terra per satèl·lit i *in situ*. Un dels satèl·lits inclosos en aquest programa és el Sentinel-2, que proporciona imatges multiespectrals d'alta resolució (10, 20 i 60 metres), abastant l'espectre visible, infraroig proper i infraroig mitjà de l'espectre electromagnètic i passa almenys 1 vegada cada 5 dies pel mateix punt. Un altre satèl·lit d'interès per a monitoritzar la vegetació i l'oceà és el Sentinel-3, que compta amb un sensor tèrmic amb el qual es pot obtenir imatges a 1 kilòmetre de resolució diàriament.

04. Projecte SEN-ET

El projecte SEN-ET (*Sentinels for Evapotranspiration* http://esa-sen4et.org/), finançat per l'Agència Espacial Europea (ESA), té com a objectiu entregar un software de lliure accés capaç de generar dades diàries d'evapotranspiració real utilitzant les dades multiespectrals de Sentinel-2 i les dades tèrmiques de Sentinel-3 del programa Copernicus.

En el marc d'aquest projecte, es van comprar 3 models per a estimar l'ET METRIC, ESVEP (Tang & Li, 2017) i TSEB (Norman & Kustas, 1995), validats en 11 llocs al voltant del món amb torres de flux, cobrint cultius i boscos localitzats en zones temperades, semiàrides i àrides (Nieto et al., 2020). El model TSEB va resultar ser el més robust per a estimar l'ET. Aquest model formula el flux de calor sensible com una sèrie de resistències, fent un símil amb la Llei d'Ohm, en què cada una de les resistències representa un impediment a la transferència de calor entre el sòl, la vegetació i l'atmosfera. A més a més, TSEB permet separar el component transpiració de l'ET total i comptar amb una gran flexibilitat per a caracteritzar el cultiu. TSEB, per tant, ha estat àmpliament utilitzat per a avaluar l'ET, un gran rang de condicions climàtiques i formacions vegetals.

Les dades d'entrada necessàries per a estimar l'ET es poden classificar en dades meteorològiques, paràmetres

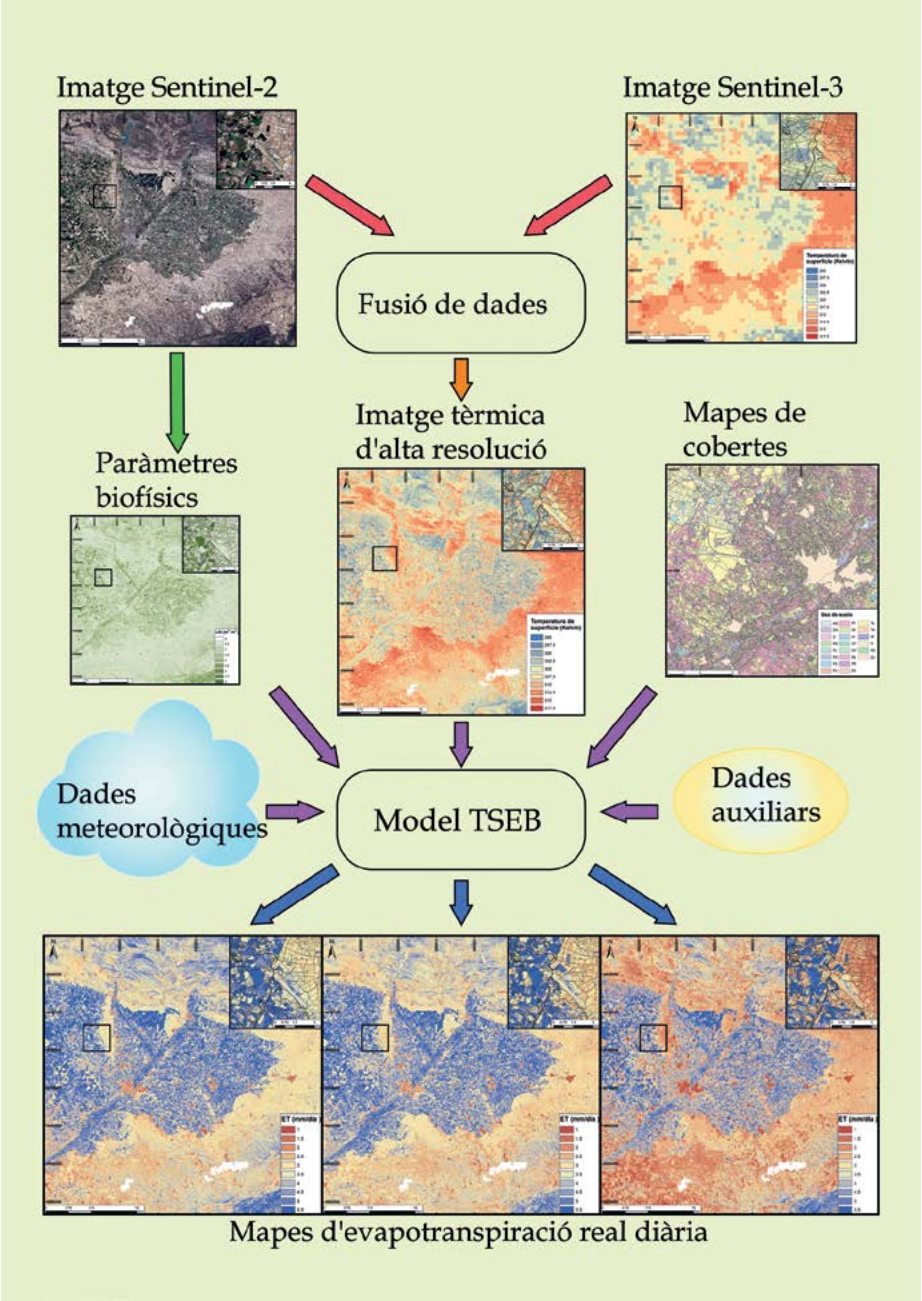


Figura 2. *Processament d'imatges Sentinel-2 i Sentinel-3 per a l'obtenció de mapes d' evapotranspiració diària mitjançant el model TSEB. Zona que inclou el Pla d'Urgell i Lleida. Els mapes d'ET corresponen a 3 dates del mes de setembre de 2019. Font: elaboració pròia.*

biofísics de la vegetació, paràmetres estructurals de la vegetació i temperatura de superfície en alta resolució.

Les dades meteorològiques s'obtenen en el marc d'aquest projecte a través del centre europeu de predicció meteorològica a mitjà termini (ECMWF), que pertanyen al programa Copernicus. Aquestes dades són sortides horàries de models numèrics calibrats i assimilats amb totes les observacions de la xarxa meteorològica mundial (WMO, https://www.ecmwf.int/en/newsletter/147/news/era5-reanalysis-production).

Els paràmetres biofísics s'obtenen a partir d'algoritmes estàndards proporcionats per l'ESA a través del seu software gratuït SNAP per al processament d'imatges Sentinel. Aquest processador només requereix la imatge Sentinel-2 i retorna paràmetres de particular interès agronòmic i forestal, com l'índex d'àrea foliar, el contingut de clorofil·la, el contingut d'aigua en la fulla, la fracció de radiació visible absorbida i la cobertura vegetal.

Els paràmetres estructurals de la vegetació s'obtenen a partir de mapes de cobertura, que indiquen a quin tipus de cultiu o bosc corresponen. D'aquesta forma es té coneixement sobre paràmetres propis d'aquesta cobertura vegetal, com seria l'altura aproximada, la distribució i mida de les fulles, entre altres. Aquests mapes de cobertura es poden obtenir de l'ESA (https://www.esa-landcover-cci.org/) a 300 metres de resolució per a tot el món. Tot i que, si es vol detallar encara més, es pot recórrer a altres mapes regionals o locals (p. ex., usos del sòl del SIGPAC o Corine Land Cover) i a partir d'ells generar els mapes corresponents.

El software del projecte SENET va acoblat a la plataforma SNAP de l'ESA incloent mòduls per a descarregar i processar cada una de les dades d'entrada per a finalment obtenir mapes d'ET diaris a 20m de resolució. En el manual d'instruccions que s'inclou en la pàgina de descàrrega del software s'expliquen els passos a seguir.

05. Conclusions

Estimar l'ET utilitzant la combinació de dades de satèl·lit i models de balanç d'energia pot ser un procés bastant complex, però, al tenir mapes diaris d'ET té un gran potencial per a estimar la demanda d'aigua dels cultius com també per a conèixer els requeriments a nivell de conca hidrogràfica.

Cal destacar també que totes les dades són d'ús gratuït i que poden ser aplicats a escala global.

S'ha de tenir en compte que encara que existeixin certes limitacions en les estimacions d'ET, sobretot per la incertesa que pot produir el fet de fusionar informació d'ona curta de Sentinel-2 amb dades tèrmiques de Sentinel-3, les dades demostren que aquest mètode és bastant acceptable mentre no es llencin noves missions tèrmiques amb major resolució.

Per saber-ne més

R. ALLEN, LUIS; S. PEREIRA; DIRK RAES; MARTIN SMITH ET AL. "Crop evapotranspiration- guidelines for computing crop water requirements". *FAO irrigation and drainage paper 56*. FAO, Rome, 300(9): D05109, 1998.

R. ALLEN; M. TASUMI & R. TREZZA. "Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC) model". *Journal of Irrigation and Drainage Engineering,* 133(4):380-394, 2007. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(380).

F. GAO; W.P. KUSTAS & M.C. ANDERSON. "A Data Mining approach for Sharpening thermal satellite imagery over land". *Remote Sensing,* 4(11):3287, 2012.

GUZINSKI, R., & NIETO, H. "Evaluating the feasibility of using Sentinel-2 and Sentinel-3 satellites for high-resolution evapotranspiration estimations". *Remote Sensing of Environment,* 221, 2019 157–172. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.11.019>

R. TANG & Z. L. LI. "An end-member-based two-source approach for estimating land surface evapotranspiration from remote sensing data". IEEE Transactions on *Geoscience and Remote Sensing,* 55(10):5818-5832, 2017. doi: 10.1109/TGRS.2017. 2715361.

J. M. NORMAN; W. P. KUSTAS & K. S. HUMES. "Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature". *Agricultural and Forest Meteorology,* 77(3-4):263293, 1995.

GUZINSKI, R.; NIETO, H.; SANDHOLT, I.; KARAMITILIOS, G. "Modelling High-Resolution Actual Evapotranspiration through Sentinel-2 and Sentinel-3 Data Fusion". *Remote Sensing.* 2020, 12, 1433.

Autoria

Christian Jofré Čekalović
Enginyer Forestal. Msc.
Teledetecció i SIG.
Programa d'ús eficient de l'aigua en Agricultura, IRTA.
christian.jofre@irta.cat

Héctor Nieto Solana
Enginyer Forestal. PhD.
Teledetecció i SIG.
Complutum Tecnologías de la Información Geográfica, S.L.
hector.nieto@complutig.com

TELEDETECCIÓ TÈRMICA AEROTRANSPORTADA per a la detecció de l'estat hídric dels cultius

01. Introducció

El terme 'reg de precisió' o '*precision irrigation*' (en anglès) es defineix com 'l'aplicació del volum d'aigua òptim, en el moment i lloc adequats tenint en compte la variabilitat espacial en les necessitats hídriques del cultiu' (Al-Karadsheh, 2002). La implementació d'aquesta definició en parcel·les comercials, no obstant, no és gens fàcil de dur a terme. La variabilitat intra-parcel·lària del sòl fa que ens trobem amb zones amb una major capacitat de retenció d'aigua i d'altres amb sòls més superficials, de manera que, si prenem una decisió de reg uniforme, possiblement sobre-regarem unes zones i d'altres romandran estressades. Per tant, l'èxit en l'adopció d'un reg de precisió recau en l'ús adequat dels sistemes de reg i en la capacitat d'utilitzar noves eines que ens permetin determinar espaciotemporalment l'estat hídric dels cultius.

La temperatura de la coberta vegetal (T_c) ha estat àmpliament utilitzada en diferents estudis com a indicador de l'estat hídric dels cultius (Jackson i altres, 1982, Möller i altres, 2007). El concepte es basa en el fet que plantes sotmeses a estrès hídric tendeixen a tancar els estomes per evitar una major pèrdua d'aigua, cosa que fa disminuir-ne la transpiració i la capacitat de fer la fotosíntesi. En conseqüència, la temperatura de la fulla augmenta a mesura que les plantes estan més estressades. Actualment, amb l'avenç de les noves tecnologies basades en la termografia aerotransportada i amb el suport de sistemes d'informació geogràfica (SIG), és possible adquirir imatges tèrmiques de grans extensions i determinar la variabilitat espacial de l'estat hídric dels cultius, i, amb aquesta informació, prendre decisions de reg de manera diferencial. La figura 1 esquerra mostra un mosaic tèrmic d'una superfície aproximada de 100 hectàrees de fruiters, mentre que a la dreta mostra en detall un assaig experimental en una plantació de presseguers on s'observen diferències de T entre arbres estressats i aquells que

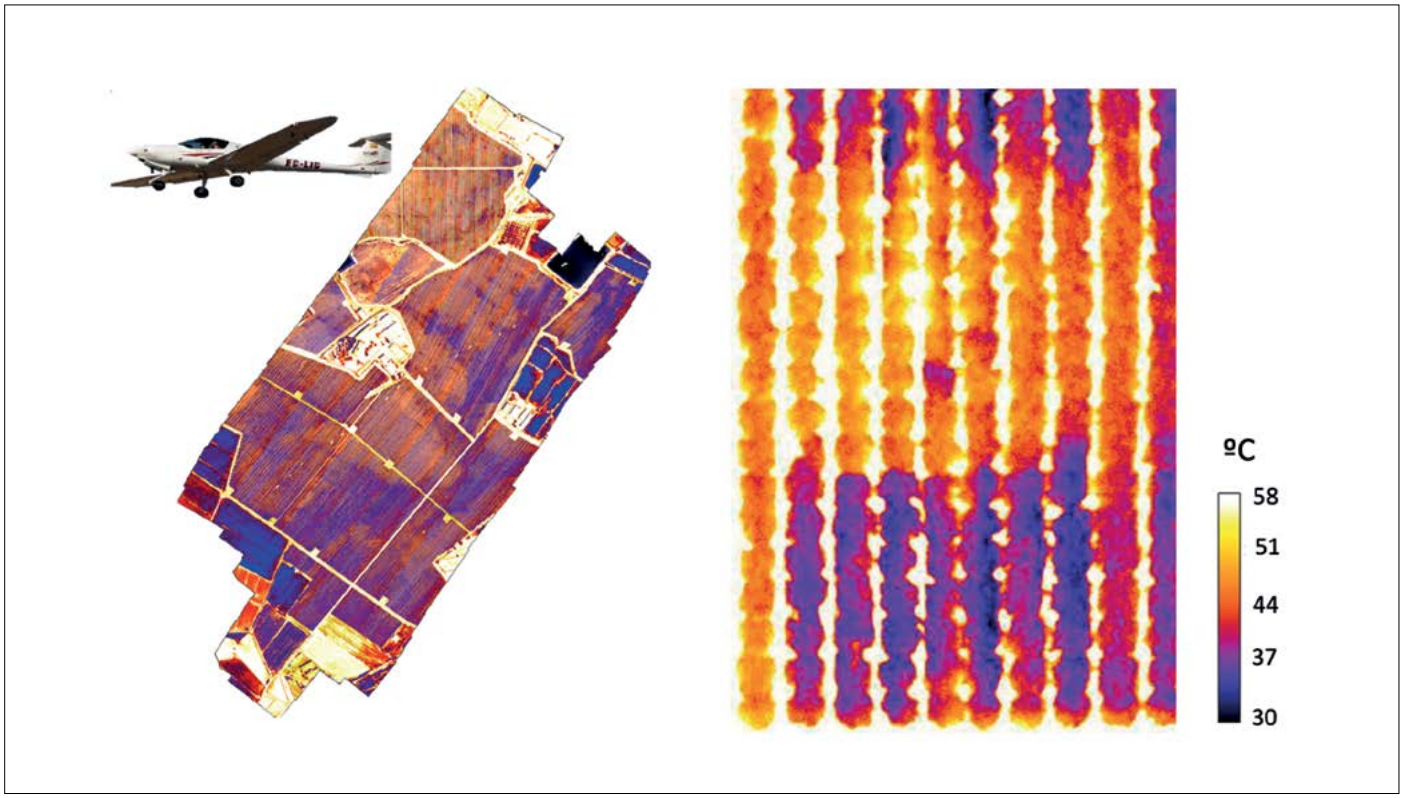


***Figura 1**. a l'esquerra, mosaic tèrmic d'una superfície d'unes 100 ha. A la dreta, dettall d'un assaig d'una plantació de presseguers. Font: IRTA, IAS-CSIC.*

transpiraven al seu màxim potencial, aquests darrers amb unes temperatures menors.

Contràriament a altres paràmetres fisiològics tradicionalment més utilitzats com ara el potencial hídric foliar (Ψ_{fulla}) o la conductància estomàtica (g_s), l'ús de T com a indicador de l'estat fisiològic de la planta compta amb la dificultat de ser afectat per les condicions climàtiques en el moment del mesurament. En aquest sentit, les situacions més favorables a l'adquisició d'aquests mesuraments es produeixen en absència de núvols i vent. Al mateix temps, per minimitzar l'efecte de la variabilitat ambiental (temperatura de l'aire, humitat relativa) i valorar convenientment l'estat hídric d'un cultiu, cal desenvolupar índexs tèrmics calculats a partir de la temperatura objecte de l'estudi en qüestió.

02. Relacions entre CWSI i potencial hídric de fulla

El *Crop Water Stress Index* (CWSI) és un indicador d'estat hídric, que és funció de T, les condicions ambientals en el moment d'adquisició de la imatge i la resposta estomàtica del cultiu (Idso *et al.*, 1981). CWSI varia entre valors de 0 (transpiració potencial) a 1 (estomes completament tancats i transpiració nul·la), i ha estat significativament relacionat amb el potencial hídric de fulla per a diferents cultius llenyosos (Bellvert *et al.*, 2014, 2016). Per exemple, la figura 2 mostra les relacions entre CWSI i Ψ_{fulla} per a presseguer, nectarina i préssec pla en diferents moments fenològics, de tal manera que en la mesura que Ψ_{fulla} és més negatiu, i per tant correspon a un cultiu més estressat, el CWSI és més pròxim a 1. Veiem que les relacions tenen una mateixa tendència per a les tres varietats de la mateixa família (*Prunus persica*), però,

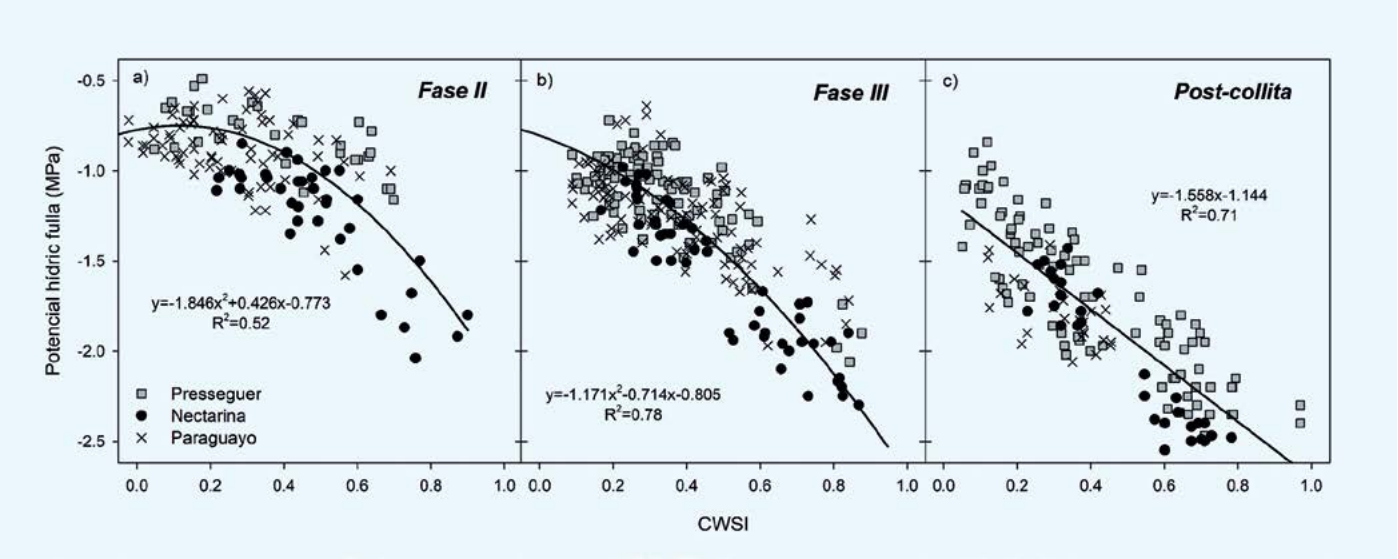


***Figura 2**. Relacions entre l'indicador d'estrès CWSI i el potencial hídric de fulla (Ψfulla), per a presseguer, nectarina i préssec plà en diferents estats fenològics. Font: IRTA*

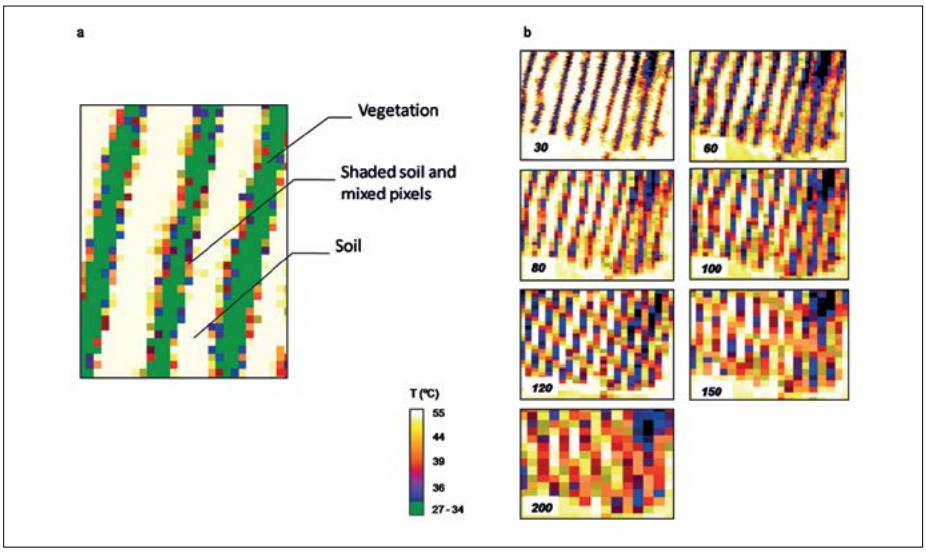


***Figura 3.** Detall d'imatge tèrmica presa en el cultiu de la vinya, a diferents resolucions (des de 30 a 200 cm). A altes resolucions (30cm), s'observa com la temperatura de la vegetació és més baixa que el sòl, i conforme la resolució disminueix, hi ha una mescla d'informació del sòl i vegetació. Font: IRTA.*

Mida del píxel (cm)	R^2	
	Vinya	Presseguer
15	0.78*	0.76*
30	0.71*	0.75*
60	0.38	0.66*
80	0.27	0.65*
100	0.22	0.56*
120	<0.10	0.28
150	0.28	0.11
200	0.29	<0.10

***Taula 1.** que mostra la relació entre potencial hídric de fulla i CWSI per a vinya i presseguer, a diferents resolucions d'imatge térmica. Font: IRTA.*

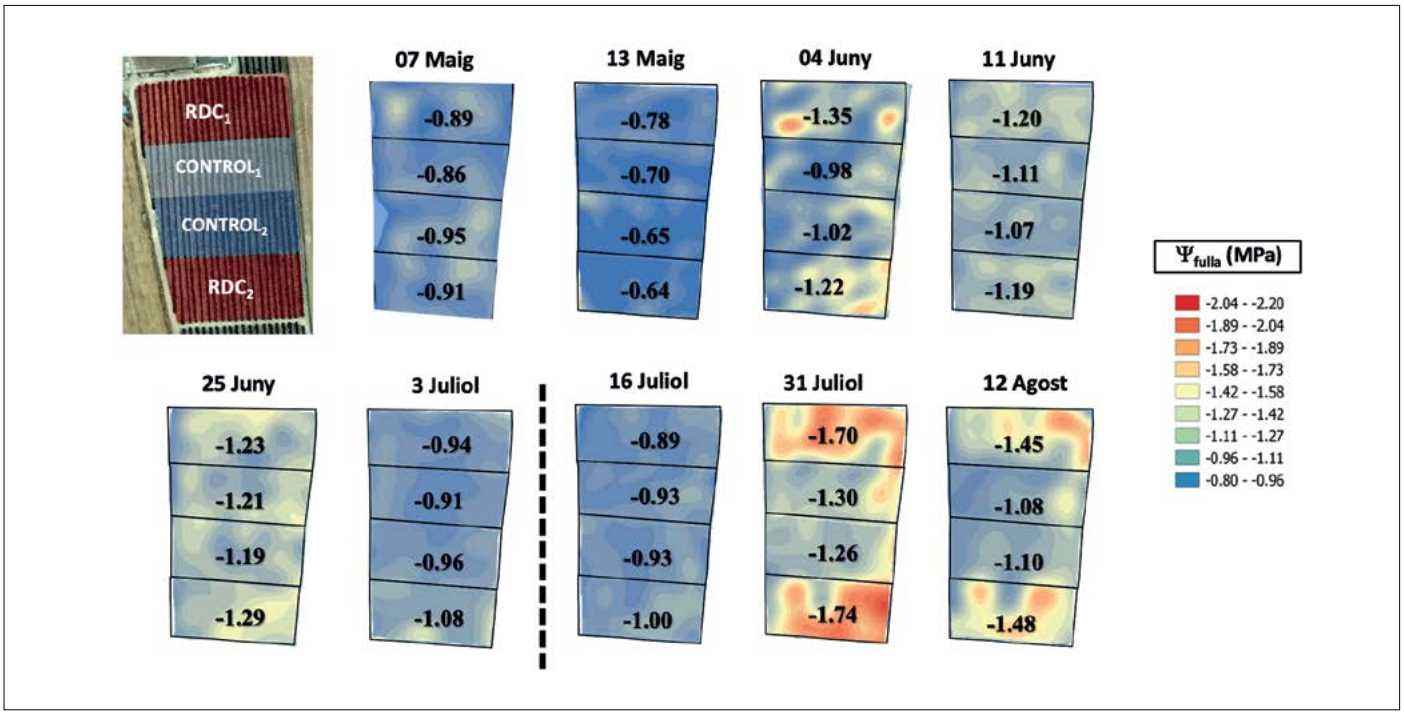


Figura 4. *Mapes de potencial hidric de fulla (Ψfulla) estimat a partir d'imatges tèrmiques i relacions amb CWSI (fig.2) per a una parcel.la de nectarina (cv. Big Top). Els valors es corresponen amb Ψfulla promig de cada sector de reg. Font: IRTA*

si comparem moments fenològics, observem que un determinat valor de Ψ_{fulla} correspon a valors de CWSI més alts en els primers estadis en comparació a la fase de post-collita. Això és perquè durant les fases fenològiques més inicials el cultiu és més sensible a l'estrès hídric i el tancament estomàtic es produeix en valors de Ψ_{fulla} més alts.

03. Resolució espacial i moment d'adquisició de les imatges

La resolució espacial (mida del píxel) de la imatge és un aspecte a tenir en compte quan volem estimar l'estat hídric d'arbres llenyosos. En aquest sentit, l'alçada del vol i l'ús de sensors amb una alta resolució espacial han de permetre seleccionar la temperatura de píxels purs de vegetació, i discriminar-la dels efectes del sòl o ombres. La figura 3 mostra una mateixa imatge tèrmica adquirida en el cultiu de la vinya a diferents resolucions (des de 30 a 200 cm). A altes resolucions (30 cm), s'observa com la temperatura de la vegetació és més baixa que el sòl, i, conforme la resolució disminueix, hi ha una mescla d'informació del sòl i vegetació. La taula 1 mostra el coeficient de determinació (R^2) de les relacions entre CWSI i Ψ_{fulla} en els cultius de la vinya i el presseguer. S'observa que, per a la vinya, les relacions són significatives fins a una mida de píxel de 30 cm, mentre que, per al presseguer, ho van ser fins a 100 cm. Això és perquè les dimensions de les vinyes, les quals estaven en un sistema de formació vertical *shoot positioning* (VSP), són molt més petites en comparació a la coberta vegetativa dels presseguers, i, per tant, són més sensibles a la selecció de píxels purs de vegetació, tal com mostra la figura 3.

De la mateixa manera, s'ha determinat que la millor hora del dia per a la detecció de possibles diferències de temperatura entre arbres correspon al moment de major demanda evapotranspirativa. Així, és recomanable adquirir les imatges entre les 13 h a 15 h.

04. Casos d'èxit: programació de reg mitjançant la termografia aerotransportada

En una parcel·la comercial de 2,2 ha de nectarina (cv. Big Top), es va programar el reg de manera diferencial. Dos sectors de reg es van regar al 100% de les seves necessitats hídriques (ET_c) (CONTROL) i en els altres dos es va adoptar una estratègia de reg deficitari controlat (RDC), la qual va consistir a reduir les aportacions d'aigua entre un 35-50% ET_c per aconseguir mantenir els Ψ_{fulla} en uns llindars preestablerts, els quals no es volien sobrepassar (p. e. -1,3 MPa durant fase fenològica II (enduriment del pinyol) i -1,70 MPa durant post-collita).

Durant la campanya de reg, es van adquirir un total de nou imatges tèrmiques de la parcel·la de nectarina. L'adquisició de les imatges es va fer amb la càmera tèrmica FLIR SC655 i una lent de 45º instal·lada en una avioneta, la qual va sobrevolar la parcel·la a una alçada de 180 m sobre el nivell de terra. La mida del píxel obtinguda va ser de ~20 cm. Les imatges tèrmiques es van post-processar i es van seleccionar píxels purs de vegetació, als quals es van aplicar els algoritmes per obtenir el CWSI i, posteriorment, convertir-los a estimacions de potencial hídric de fulla utilitzant les equacions de la figura 2. Segons les estimacions de Ψ_{fulla}, es prenia una decisió de reg.

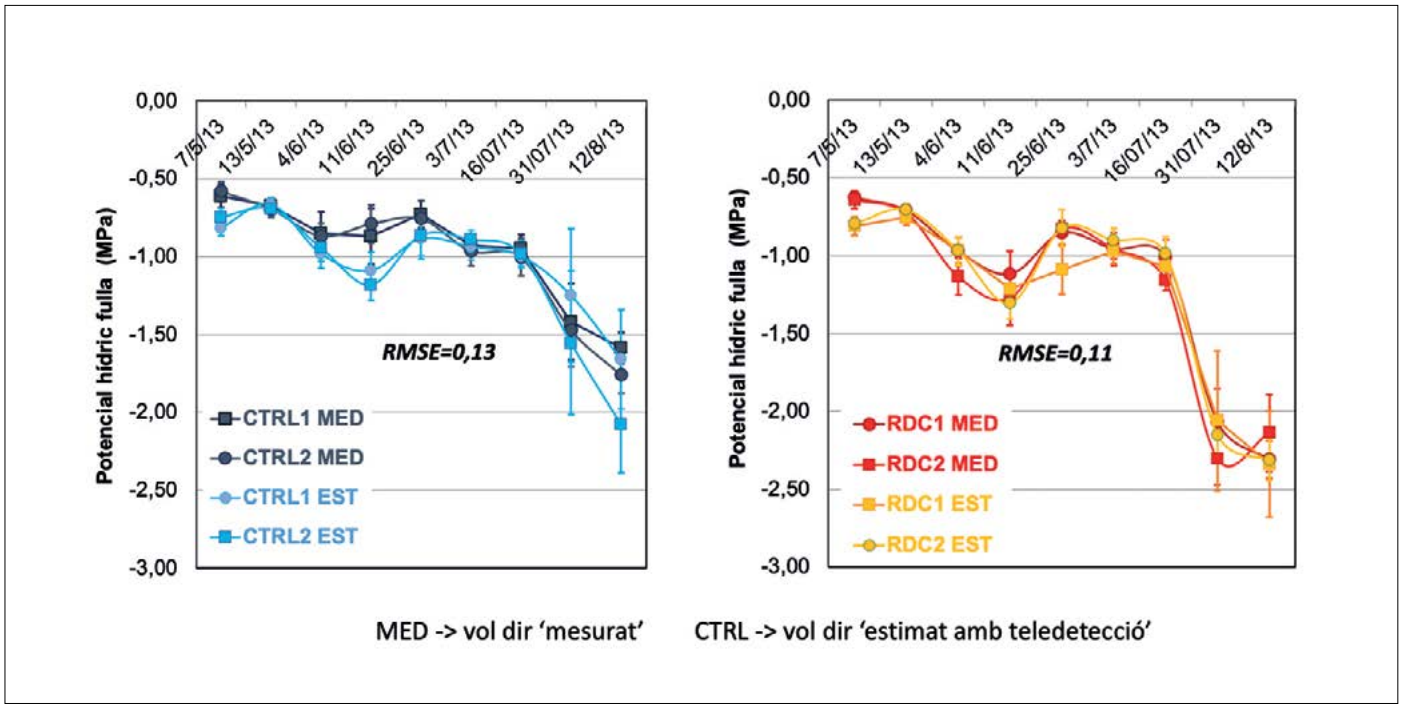


Figura 5. *Evolució estacional de les estimacions i mesures de potencial hídric de fulla (Yfulla) en la parcel.la de nectarina, utilitzant teledetecció. RMSE es correspon amb el root mean square error (error de les estimacions). Font: IRTA.*

S'observa com, durant les fases fenològiques inicials, no es van identificar diferències d'estat hídric entre sectors de reg i els Ψ_{fulla} van variar entre -0,64 a -0,95 MPa. Durant la fase fenològica II (enduriment del pinyol), es van detectar les primers diferències d'estat hídric: els sectors de reg sotmesos a RDC van mostrar uns Ψ_{fulla} més negatius (4 de juny). Altra vegada, atès que la fase fenològica III és quan es produeix el creixement del fruit de manera més pronunciada, i, per tant, és sensible a l'estrès hídric, no hi va haver diferències d'estat hídric entre sectors de reg, ja que es va tornar a regar a plena dotació. Finalment, durant la fase de post-collita és quan hi va haver les màximes diferències (31 de juliol i 12 d'agost).

Paral·lelament a l'adquisició de les imatges, es van prendre mesuraments de Ψ_{fulla} in situ com a mesura de validació. La figura 5 mostra l'evolució temporal de les estimacions i mesuraments de Ψ_{fulla} per a cada sector de reg, i pot observar-se que ambdues segueixen la mateixa tendència amb un RMSE (*root mean square error*) de 0,11 a 0,13 MPa per als RDC i CONTROL, respectivament.

L'aigua aportada als sectors del tractament CONTROL va ser de 330 i 380 mm fins a mitjan agost, mentre que els sotmesos a RDC van rebre 170 mm. Per tant, l'adopció d'una estratègia de RDC en aquesta parcel·la va permetre estalviar un 35% d'aigua fins a collita, i un 48% fins a mitjan agost. A més, no es van detectar diferències significatives en la producció.

Per saber-ne més

AL-KARADSHEH, E. "Precision Irrigation: New strategy irrigation water management". In Proceedings of the Conference on International Agricultural Research for Development, Deutscher Tropentag, Wiltzenhausen, Germany, 9–11 October 2002; pp. 1–7.

MÖLLER, M. ; ALCHANATIS, V.; COHEN, y.; MERON, M.; TSIPRIS, J.; NAOR, A.;OSTROVSKY, V.; SPRITSIN, M.; COHEN, S. "Use of thermal and visible imagery for estimating crop water status of irrigated grapevine". *J. Exp. Bot*. 2007, 58, 827–838.

JACKSON, R. "Canopy temperature and crop water stress". *Adv. Irrig*. 1982, 1, 43–85.

IDSO, S. B.; JACKSON, R. D.; PINTER, P. J.; REGINATO, R. J.; HATFIELD, J. L. "Normalizing the stress-degree day parameter for environmental variability". *Agric. Meteorol*. 1981, 24, 45–55.

BELLVERT, J.; ZARCO-TEJADA, P. J.; GIRONA, J.; FERRERES, E. "Mapping crop water stress index in a "Pinot-noir"vineyard: Comparing ground measurements with thermal remote sensing imagery from an unmanned aerial vehicle". *Precis. Agric.* 2014, 15, 361–376.

BELLVERT, J.; MARSAL, J.; GIRONA, J.; GONZÁLEZ-DUGO, V.; FERRERES, E.; USTIN, S.; ZARCO-TEJADA, P.J. "Airborne thermal imagery to detect the seasonal evolution of plant water status in peach, nectarine and Saturn peach orchards". Special issue: *Remote Sensing* in *Precision Agriculture. Remote Sens.* 2016, 8, 39.

Autoria

Joaquim Bellvert Ríos
IRTA Fruitcentre, Lleida
Programa Ús Eficient de l'Aigua en Agricultura
joaquim.bellvert@irta.cat

LÒGICA DEL CONTROL DEL REG

Reg per degoteig. Foto: IRTA.

01. Introducció

En aquest article introduirem breument l'ús d'algunes aproximacions per a supervisar, controlar i optimitzar el reg. N'hi ha de més senzilles i de més complexes. Depenent de la casuística de cada parcel·la regada, seran més convenients les unes o les altres.

02. Balanç hídric

L'aproximació més recomanable i més estesa per determinar les aportacions de reg als conreus és el mètode, proposat per la FAO, basat en el balanç hídric (Allen *et al.*, 1998), que consisteix en aportar el reg necessari per tal de compensar el balanç entre sortides i entrades d'aigua al sòl. Les principals entrades solen ser la pluja i el reg i la principal sortida n'és l'evapotranspiració pel cultiu (ETc). A efectes pràctics, l'ETc es pot estimar a partir d'una evapotranspiració de referència (ETo) calculada amb dades meteorològiques i un coeficient de cultiu, Kc, que ho converteix al cultiu d'interès.

$$ETc = ETo * Kc$$

El càlcul del volum de reg necessari té en compte la pluja efectiva, Pef, que és aquella part de la pluja que realment s'acaba infiltrant al sòl i és usable per al cultiu. Un altre paràmetre rellevant és l'eficiència del sistema de reg, efR, que té em compte pèrdues i manca d'uniformitat en el repartiment.

$$reg = (ETc - Pef) / efR$$

Hi ha altres entrades i sortides, que a vegades poden ser rellevants, però en general són força més difícils de quantificar, com ara el drenatge en profunditat, l'ascens capil·lar o l'escolament per la superfície del sòl. El més habitual és ignorar-les o incorporar-les indirectament dins dels conceptes d'eficiència.

El gran avantatge del balanç hídric és que determina objectivament quin volum de reg cal aportar i això és la base tant per planificar quin volum d'aigua podrem necessitar al llarg d'un cicle de cultiu, com també per fer prescripcions de reg en un moment donat. És el mètode ideal en aquells casos que els components del balanç hídric són prou previsibles. Ara bé, no sempre és tan simple. A vegades apareixen incerteses importants a l'hora de quantificar entrades i sortides. Sovint, allò que en complica l'aplicació és el coneixement

precís de la Kc. Si bé la Kc és prou previsible en conreus de cobertura homogènia, és molt més imprecisa en cultius on la planta no cobreix tot el marc de plantació i amb una disposició tridimensional que no sempre és la mateixa, com passa entre plantacions amb diferent sistema de formació. A més, aspectes com la càrrega de fruits que duen els arbres i el seu historial previ també afecten l'ETc d'una manera que sol ser complexa de quantificar. Per la seva banda, l'estimació de quanta aigua hi ha disponible al sòl provinent de pluges anteriors rarament es pot resumir en una fórmula senzilla. Per això, el balanç hídric a vegades presenta limitacions que poden requerir combinar-la amb altres aproximacions.

Amb sensors podem aconseguir que el reg s'acomodi espontàniament a la demanda i respongui a factors complexos sense que ni tan sols els haguem previst.

03. Control directe amb sensors

L'ús de sensors pot permetre modular el reg sense haver de fer cap suposició sobre el balanç hídric del sòl. L'avantatge és que podem aconseguir que el reg s'acomodi espontàniament a la demanda i respongui a factors complexos sense que ni tan sols els haguem previst. Això permet sistemes prou senzills però eficaços, que troben aplicació sobretot en petites instal·lacions de reg, com ara hivernacles, vivers i jardineria. Hem de tenir en compte que en instal·lacions de reg una mica grans no sol ser viable engegar/aturar el reg en qualsevol moment, perquè ocasionaria un desgavell en el sistema hidràulic. Aquesta gestió del sistema hidràulic l'ha de fer un autòmata de reg, que coordinarà la programació dels diversos sectors de reg de manera que no entrin en conflicte entre ells. Per tant, els sensors no haurien de saltar-se l'autòmata sinó que s'haurien d'usar com a condicionants en els seus programes.

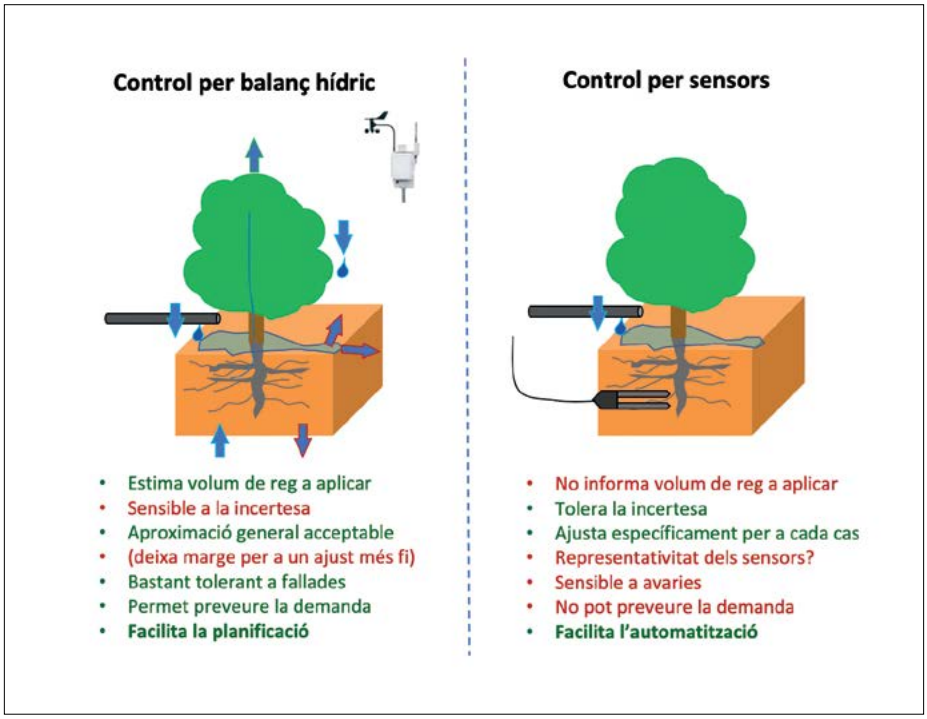
Alguns inconvenients que presenta el control directe del reg usant sensors són que, en general, els sensors no informen de quina quantitat d'aigua s'ha d'aportar, tan sols indiquen si en falta o no. A més, només responen a allò que està passant en el precís moment i no ofereixen cap previsió dels requeriments de reg que tindrem més endavant.

04. Balanç hídric ajustat amb sensors

El control de reg per balanç hídric i el control per sensors presenten avantatges i inconvenients complementaris. Combinar-los ofereix la possibilitat de sumar la fiabilitat i capacitat de previsió del balanç hídric i, per l'altra banda, l'ajust espontani i precís a les condicions locals que ofereixen els sensors.

El balanç hídric ajustat amb sensors és ideal per al reg de precisió. La informació més immediata per reajustar-ne les dosis és la proporcionada per sensors d'humitat del sòl, que de moment són els únics que permeten detectar tant excessos de reg, com desajustos en el balanç abans que no afectin les plantes. En cas de reg localitzat, la instal·lació i interpretació dels sensors al sòl és més complicada, perquè l'aigua està distribuïda de manera molt heterogènia. Això, però, no ha de ser un impediment per al seu ús si s'escullen bé els punts d'instal·lació dels sensors quant a posició respecte als degoters i fondària en el sòl (Soulis *et al.*, 2015). A l'analitzar les dades, convé parar atenció a les tendències entre dies consecutius, més que no pas als valors absoluts enregistrats en un moment donat.

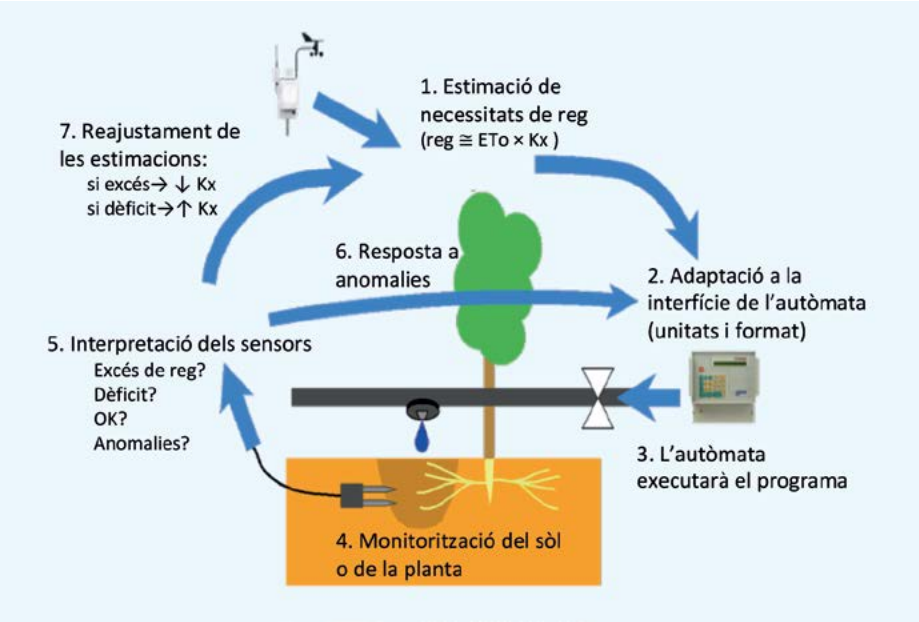
Quan sí que trobem una limitació amb les mesures d'humitat del sòl és si el cultiu es desenvolupa en condicions d'estrès hídric. A mesura que un sòl es va assecant, no ho fa de manera uni-



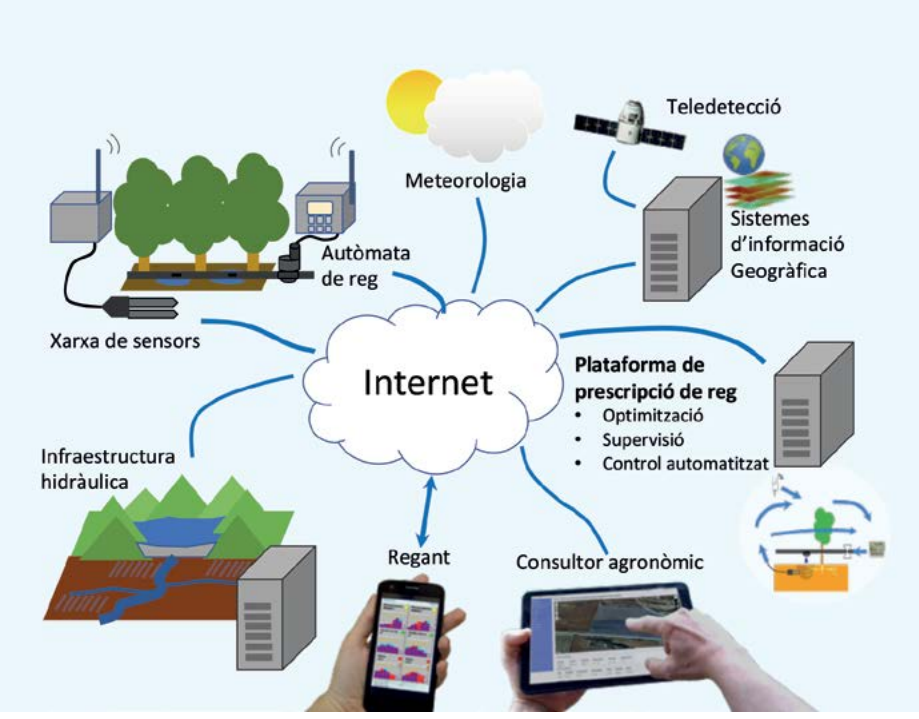
Comparació d'avantatges i inconvenients entre el control de reg per balanç hídric i el control directament per sensors. Font: IRTA.

forme i les diferències segons fondàries i posicions dins d'un mateix marc de plantació es fan molt marcades. Això dificulta conèixer quanta aigua hi ha disponible al sòl, de manera que, sota condicions d'estrès hídric, millor complementar-ho amb mesures a les plantes. Mesurant l'estat hídric de les plantes, sabrem si tenen disponible l'aigua que requereixen, sigui com sigui que l'aconsegueixin. Hi ha diferents tipus de sensors per fer-ho, per exemple sensors de temperatura foliar, sensors de turgència foliar, psicròmetres que mesuren l'estat hídric del tronc, dendròmetres que en mesuren contraccions, etc. En general, el fet que els sensors en planta no s'usin

La fiabilitat i capacitat de previsió del balanç hídric es pot combinar amb l'ajust espontani i precís a les condicions locals que ofereixen els sensors.



Esquema de l'algorisme de control de reg per balanç hídric ajustat amb sensors. Font: IRTA.



Integració de sistemes per al control intel·ligent del reg a través d'una plataforma de prescripció online. Font: IRTA.

més pot ser degut al fet que en condicions de camp estan força exposats al vent, a feines agrícoles, animals, reacció de les mateixes plantes, etc. i sovint requereixen tasques de manteniment periòdic per fer-los funcionar de manera fiable. La teledetecció ofereix mètodes prometedors per monitorar l'estat hídric, en concret el *Crop Water Stress Index,* CWSI, que es pot usar per gestionar el reg (Bellvert *et al*., 2016). Així doncs, en condicions d'estrès, els indicadors d'estat hídric (que poden venir de sensors en les plantes o de teledetecció) es poden usar com a font de retroalimentació del balanç, de manera semblant a com usem els sensors de sòl en condicions de no estrès (Casadesús *et al*., 2012).

Sovint no disposem de prou aigua o no ens convé usar-la tal com la demanen les plantes: caldrà usar altres estratègies.

D'altra banda, l'estimació d'ETc també es pot fer més precisa mesurant sobre la marxa, al llarg del cicle de cultiu, el seu vigor vegetatiu. La teledetecció satel·lital és una tecnologia molt prometedora per monitorar gairebé a temps real el vigor de la vegetació i fins i tot l'ETc, tal com es comenta en altres articles d'aquest dossier. Cal notar, però, que és massa simplista suposar que el reg de precisió sempre ha de ser proporcional al vigor o a l'ETc. A

vegades, aquests paràmetres ja estan condicionats per la disponibilitat d'aigua, en el sentit que les zones de menor ETo podrien correspondre a les zones més limitades hídricament -p. ex., per les propietats del sòl– i aleshores un reg proporcional a l'ETc encara accentuaria més les diferències. La complementació del vigor i l'ETc amb mesures d'estat hídric, i sobretot amb simulacions del cultiu, permet discriminar millor aquests casos.

05. Optimització del reg

Fins aquí hem suposat que el reg ideal és el que demani el cultiu. Però no sempre és així. Sovint no disposem de prou aigua o no ens convé usar-la tal com la demanen les plantes: caldrà usar altres estratègies. Per exemple, en el cas de les dotacions de reg de suport, si deixéssim que el cultiu demanés l'aigua, l'esgotaríem molt abans de completar la campanya. També pot ser el cas de situacions en què l'aigua té un cost elevat. I també, en casos com la vinya i alguns fruiters, el reg que demanaria la planta seria perjudicial per la qualitat de la collita. En aquest context, existeixen estratègies per assolir els objectius productius, a base de repartir l'aigua disponible i uns nivells d'estrès en fases concretes del cicle de cultiu.

Les simulacions de cultius poden ajudar a planificar i optimitzar les campanyes de reg. Tradicionalment, les simulacions han estat limitades per la disponibilitat de dades per configurar i calibrar els models de cara a usar-los en zones molt específiques. Actualment, el conjunt de dades que mou el reg de precisió, des de sensors a camp fins a imatges de teledetecció, poden ajudar molt a facilitar la usabilitat i l'encert d'aquests models.

Mòdul sense fils per a la mesura de sensors a camp. Foto: IRTA.

Per saber-ne més

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. "Crop evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements". *FAO Irrigation and Drainage Paper 56*, 1998, Rome.

BELLVERT, J., ZARCO-TEJADA, P.J., MARSAL, J., GIRONA, J, GONZÁLEZ-DUGO, V. AND FERERES, E. (2016). "Vineyard irrigation scheduling based on airborne thermal imagery and water potential thresholds". *Australian Journal of Grape and Wine Research* 22, 307–315, 2016.

CASADESÚS, J., MATA, M., MARSAL, J., & GIRONA, J. (2012). "A general algorithm for automated scheduling of drip irrigation in tree crops". *Computers and Electronics in Agriculture, 83*, 11–20. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.01.005>

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". *Agric. Water Manag.* 2020, 228, 105880.

MILLÁN, S.; CASADESÚS, J.; CAMPILLO, C.; MOÑINO, M.J.; PRIETO, M.H. (2019). "Using Soil Moisture Sensors for Automated Irrigation Scheduling in a Plum Crop". *Water* 2019a, 11, 2061.

SOULIS, K. X., ELMALOGLOU, S., DERCAS, N. (2015). "Investigating the effects of soil moisture sensors positioning and accuracy on soil moisture based drip irrigation scheduling Systems". *Agric. Water Manag.* 148, 258-268.

Autoria

Jaume Casadesús Brugués
IRTA Fruitcentre, Lleida
Cap del Programa Ús Eficient de l'Aigua en Agricultura.
jaume.casadesus@irta.cat

Jesús Domínguez-Niño
Programa d'Ús Eficient de l'Aigua en Agricultura, IRTA.
jesus.dominguez@irta.cat

SENSORS DE SÒL
per optimitzar la zonificació del reg

01. Introducció

El sòl és espacialment variable de forma natural. Aquesta variabilitat no solament és en superfície, sinó també en profunditat. I, el que és més important, aquesta variabilitat es pot fer patent a diferents escales espacials. És a dir, el sòl pot presentar propietats diferents dins una mateixa parcel·la, independentment de la seva mida. Fins i tot, les parcel·les petites (menys d'una hectàrea), encara molt freqüents en fructicultura, poden tenir una variació important en les propietats dels sòls dins la mateixa parcel·la. De tota manera, que el sòl sigui variable, i que aquesta variabilitat es faci visible afectant després els cultius que hi creixen i la seva productivitat és un fet prou conegut. Per altra banda, el caràcter intrínsec dels sòls com a cossos naturals, que es desenvolupen en profunditat, fa que sigui difícil conèixer en detall la seva variabilitat.

Actualment, els agricultors i tècnics tenen a l'abast una diversa varietat de sensors per caracteritzar el sòl. Entre els més utilitzats per a la programació del reg destaquen els sensors d'humitat que, a falta d'una resolució espacial elevada (només se n'instal·len unes poques unitats per parcel·la o hectàrea), permeten monitoritzar l'evolució temporal de la humitat i ajustar-ne en conseqüència la programació del reg. Ara bé, el problema de les sondes d'humitat és la representativitat de les dades. És a dir, quina és la superfície de la parcel·la que representen? Això és normalment desconegut, si no s'ha fet abans un mapat de sòls d'alta resolució per tal de conèixer la seva variabilitat i les zones homogènies que es poden derivar. A més, aquesta informació detallada del sòl tampoc no se sol tenir en compte a l'hora de dissenyar el reg i la seva sectorització. Així, la majoria dels sistemes de reg es dissenyen segons criteris hidràulics i d'uniformitat, però sense tenir en compte la variabilitat de les propietats del sòl (per exemple, textura, capacitat de retenció d'humitat, permeabilitat, etc.).

La qüestió que queda pendent és, doncs, disposar de la informació sobre la variabilitat dels sòls que, abans fins i tot de dissenyar el reg agronòmicament i hidràulicament, faci possible: i) sectoritzar el sistema de reg i adaptar-lo a la variabilitat espacial del sòl, ii) determinar el nombre de sensors d'humitat que serà necessari instal·lar a nivell de parcel·la (possiblement, lligat a la sectorització) i, iii) decidir quin és l'emplaçament més adequat d'aquests sensors d'humitat per tal d'obtenir dades representatives, en les quals basar els moments i les recomanacions de dosi.

Dins l'àmbit de l'anomenada Agricultura de Precisió, els sensors que mesuren la conductivitat elèctrica apa-

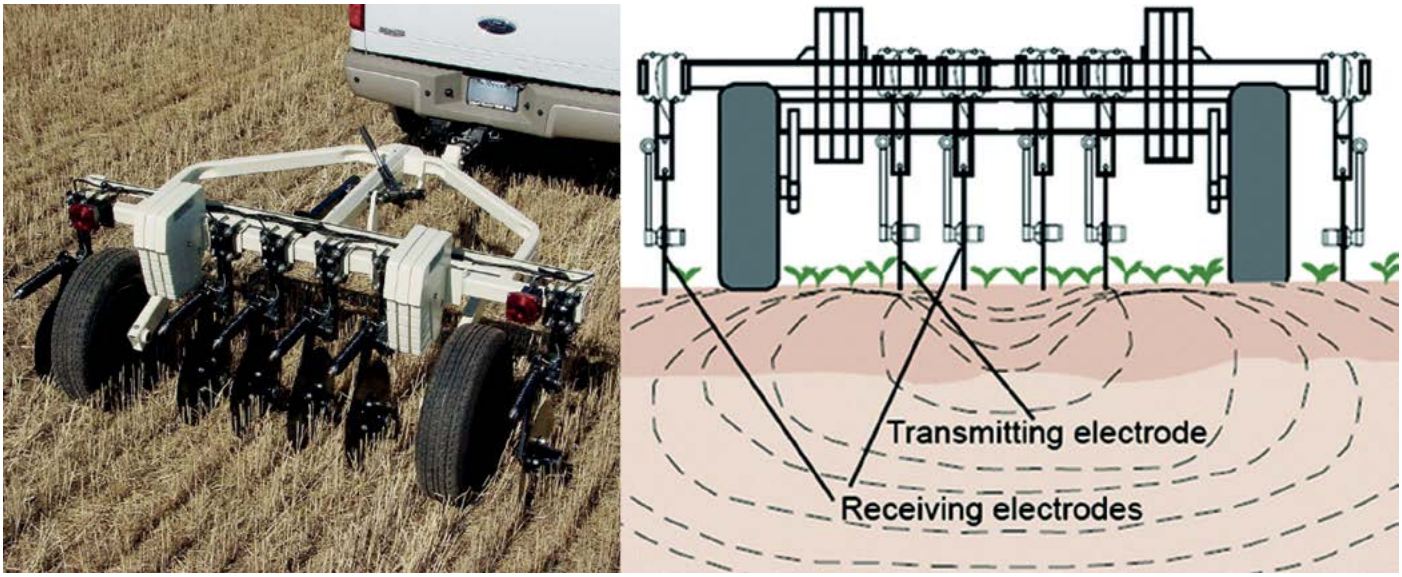


Figura 1. *Sensor Veris 3100. Font: Veris Technologies, Inc., Salina, KC, USA*

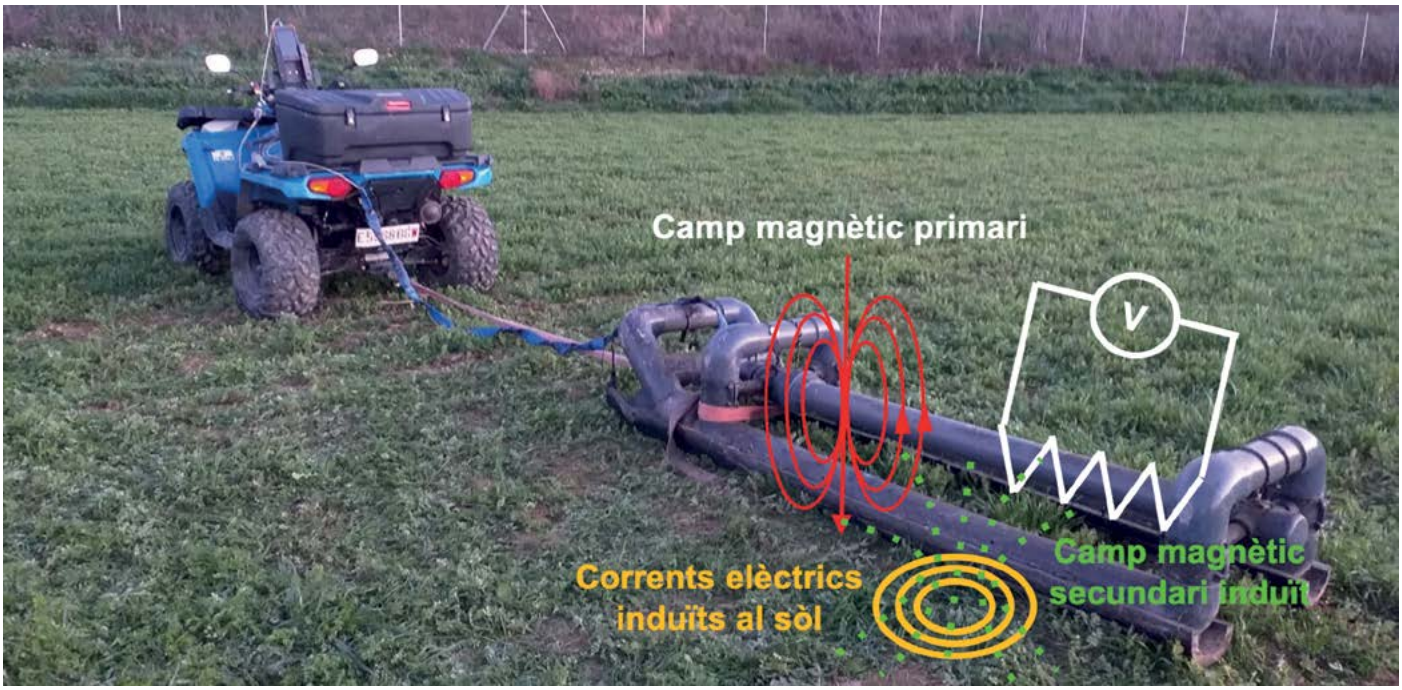


Figura 2. *Sensor Dualem de l'empresa Agrarium (Dualem, Inc., Milton, ON, Canadà). Font: J. Arnó.*

rent del sòl (CEa) en continu poden ser una alternativa a tenir en compte quan es vol optimitzar la sectorització dels sistemes de reg. Es tracta d'uns dispositius (disponibles al mercat) que, desplaçats sobre les parcel·les, permeten mesurar la CEa amb una elevada densitat de dades (mesures contínues), i georeferenciar-les mitjançant un sistema satel·lital de navegació global (GNSS, per exemple, GPS). El mapat d'aquesta informació (mapes de CEa) és un bon punt de partida per a la caracterització del sòl i la seva variabilitat. La textura (argila), el contingut d'aigua del sòl, la matèria orgànica, la capacitat d'intercanvi catiònic o la salinitat (sobre tot, en àrees semiàrides) són propietats que solen estar relacionades amb la CEa. Així, aquest tipus de sensors i els mapes resultants poden aportar una mesura indirecta d'aquestes propietats i del patró espacial de variabilitat. En aquest article, es fa una revisió de les tècniques comunament utilitzades per a la mesura de la CEa del sòl, i es donen alguns exemples de les possibilitats d'ús dels mapes de CEa per a la zonificació a nivell de parcel·la.

02. Sensors per a la mesura de la CEa del sòl

La mesura de la CEa comporta mesurar aquesta propietat en un volum de sòl, sent important abastar la profunditat de sòl explorada per les arrels. Els sensors existents per mesurar aquesta propietat en continu es diferencien segons el mètode utilitzat per introduir un corrent elèctric en el sòl: contacte galvànic directe, o per inducció electromagnètica. De fet, la conductivitat elèctrica no és més que la mesura de la facilitat amb la qual un corrent elèctric circula a través d'un medi, en aquest cas, el sòl. En ambdós casos, el sòl mostrarà una reacció determinada al pas de l'electricitat depenent de les seves propietats. La CEa es mesura en unitats de Siemens per metre (S/m), encara que en el cas del sòl la unitat més habitual és mS/m.

02.01 Sensors de contacte galvànic

La figura 1 mostra el sensor Veris 3100 (www.veristech.com). En aquesta mateixa pàgina web, es pot trobar el següent comentari d'un productor d'arròs de Califòrnia: "The Veris machine is a simple, yet effective tool that is essential for any site-specific crop management program" (*La màquina Veris és una eina senzilla, però eficaç, bàsica per a qualsevol programa de gestió diferenciada de cultius*).

Certament, el principi de funcionament és molt simple. El corrent elèctric és introduït en el sòl a través d'un parell de discos que actuen com a elèctrodes de corrent (elèctrodes de transmissió). Depenent de les propietats fisicoquímiques del sòl, aquest serà millor o pitjor conductor de l'electricitat, i el sensor captarà un senyal elèctric de major o menor magnitud. Això es fa mitjançant dues parelles addicionals de discos (elèctrodes de voltatge). Un d'aquests parells de discos de voltatge es troba situat entre els discos de corrent, sent la CEa associada a aquests discos la corresponent a un volum de sòl explorat superficial (entre 0-30 cm). Els altres dos discos de voltatge estan situats en els extrems de la barra suport, per fora de les rodes de transport. Aquesta major distància entre discos permet tancar un circuit elèctric dins d'un volum de sòl fins a una

La sectorització òptima dels sistemes de reg hauria de basar-se en l'anàlisi prèvia de la variabilitat espacial del sòl. Els mapes de conductivitat elèctrica aparent del sòl (CEa) són una bona eina per a aquest propòsit.

Els sensors de conductivitat elèctrica aparent del sòl (de contacte galvànic o d'inducció electromagnètica) presenten capacitats similars pel que fa a hectàrees mesurades per dia i resolució espacial obtinguda.

profunditat aproximada de 90 cm. Per tant, mitjançant aquesta configuració dual, el sensor Veris proporciona dues mesures de CEa (superficial i profunda). Aquesta funcionalitat és avantatjosa, ja que permet avaluar si les propietats del sòl es mantenen uniformes amb la profunditat o, per contra, el sòl presenta capes o horitzons amb diferents propietats edàfiques contrastants. Finalment, cal destacar la possibilitat de desplaçar el sensor fins a velocitats de 22 km/h. La presència de rostoll abundant, sòls molt secs o amb pedregositat superficial poden dificultar el contacte dels elèctrodes amb el sòl i l'adquisició correcta de les dades.

02.02 Sensors d'inducció electromagnètica

La inducció electromagnètica (IEM) fa referència a la creació d'un corrent elèctric quan un camp magnètic travessa un conductor, i viceversa. La figura 2 mostra el sensor Dualem (www.dualem.com), el qual es basa en aquest principi. En la seva concepció més simple, el sensor disposa d'una bobina que, alimentada per un corrent altern, genera un camp magnètic primari que s'introdueix en el sòl. El desplaçament del sensor sense contacte amb el sòl indueix uns corrents elèctrics, ja que ara el sòl es comporta com un conductor. La major o menor conductivitat elèctrica del sòl farà que els corrents induïts generin, en una segona etapa, un camp magnètic secundari de magnitud proporcional que, afegit al camp magnètic primari, acaben travessant la segona bobina. El voltatge mesurat en aquesta última estarà, doncs, relacionat amb la conductivitat elèctrica aparent del sòl.

Comparat amb els sensors galvànics, els sensors IEM tenen l'avantatge que no és necessari garantir un bon contacte entre el sòl i els discos del sensor. Per contra, els sensors IEM requereixen un calibratge més complex. A més, la presència propera d'elements metàl·lics pot ocasionar interferències en les mesures. Pel que fa a capacitats, ambdues tipologies de sensors presenten valors similars. Depenent de la separació entre passades del sensor i la velocitat, en ambdós casos es poden mesurar diverses hectàrees per dia i aconseguir resolucions espacials de 400 o més lectures/ha.

03. Mapes de conductivitat elèctrica i zonificació a nivell de parcel·la

En aquesta part de l'article, i a mode il·lustratiu, es mostren dos exemples del mapat de la CEa del sòl i de l'aplicació d'aquest tipus de dades per a la caracterització de la variabilitat de les propietats dels sòls i la zonificació de les parcel·les amb la finalitat de portar a terme una Agricultura de Precisió.

03.01 Aplicació en cultius extensius

Moltes de les parcel·les que tenen els agricultors en l'actualitat provenen de reparcel·lacions que s'han anant fent des de la segona meitat del segle XX, i així facilitar la mecanització de l'agricultura. S'han creat parcel·les més grans en base a moviments de terres i anivellaments, induint una major variabilitat en les propietats dels sòls. Això, al seu torn, produeix un comportament desigual en el desenvolupament dels cultius i els seus rendiments.

Tenir coneixement de les propietats dels sòls i la seva variabilitat espacial esdevé clau per tal de millorar els rendiments i també la qualitat de la producció. En base a aquest coneixement, l'agricultor pot decidir millor les accions a dur a terme en cada zona de la parcel·la. Un exemple d'aplicació és el que es mostra en la figura 3, en una parcel·la d'aproximadament 100 ha dedicada al conreu de cultius extensius. La reparcel·lació realitzada durant els anys 80 va crear una única parcel·la a partir de diverses parcel·les més petites, separades per marges i bancals, les quals s'adaptaven a la morfologia del terreny, i que mostraven propietats del sòl diferents. El mapat amb el sensor Veris 3100 va mostrar un rang de valors molt variable, des de 6 mS/m fins a 210 mS/m, amb un patró de variabilitat espacial que mostra diferents zones amb valors baixos, mitjans i alts. La interpretació d'aquests valors és molt important, ja que pot posar de manifest problemes de salinitat (per exemple, valors majors de 80-100 mS/m), o zones de textura grollera (sòls sorrencs) o excés de pedregositat (per exemple, valors menors de 20 mS/m), amb baixa fertilitat i capacitat de retenció d'aigua.

Els mapes de CEa es poden comparar amb mapes de rendiment o mapes d'índexs de vigor calculats a partir d'imatges multiespectrals (satèl·lit, avioneta, dron). La figura 3 mostra els mapes de collita de blat de moro i CEa per a la mateixa parcel·la. S'hi observa que el mapa de la CEa pot ajudar a inferir problemes de sòls que no es posen directament de manifest en el

mapa de rendiment. Així, les zones A i B mostren un baix rendiment, el qual es correspon amb una alta CEa (amb valors per sobre dels 100 mS/m). Això indica problemes de salinitat en el sòl que, en zones agrícoles de la vall de l'Ebre (com és el cas de la localització de la finca de la figura 3), solen estar associats a problemes de drenatge. La zona C és diferent, ja que hi ha un baix rendiment amb una baixa CEa. Això indica que, malgrat que el mapa de collita en aquesta zona (C) mostra valors de rendiment similars als de les zones A i B, la raó no és la mateixa, ja que els valors de CEa són molt diferents. A la zona C hi ha sòls de textura sorrenca, amb baixa fertilitat i baixa capacitat de retenció d'aigua, que és la causa del baix rendiment. La zona D, amb valors intermedis de CEa, que indiquen textures més equilibrades sense presència de salinitat, es correspon amb la zona amb rendiments més elevats.

La correcta interpretació de les dades de CEa del sòl pot ajudar a inferir les causes del comportament dels cultius i dur a terme accions per a la millora del potencial productiu de les parcel·les.

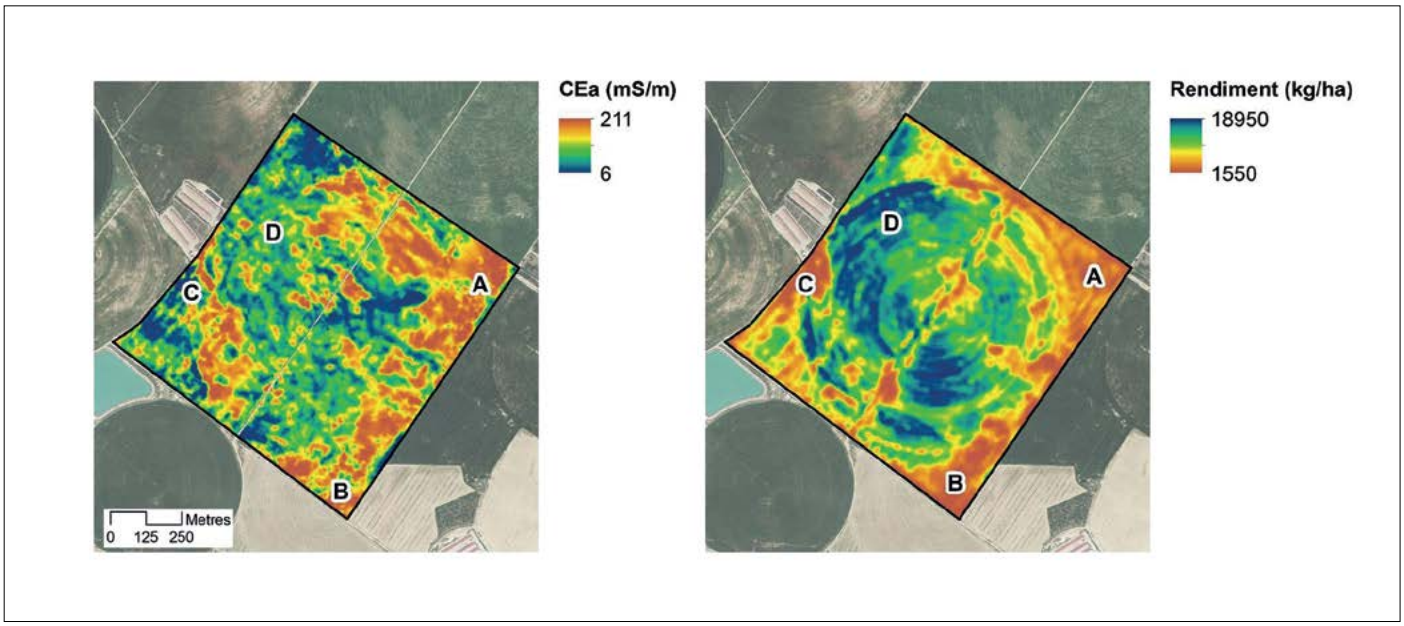


Figura 3. *Comparació de la conductivitat elèctrica aparent (CEa) d'una parcel·la agrícola dedicada a cultius extensius obtinguda a partir de les dades del sensor Veris 3100 (esquerra), i mapa de collita de blat de moro de la mateixa parcel·la (dreta). Les lletres indiquen diferents llocs per a la comparació que es comenten en el text. Les paletes de colors de les llegendes estan invertides per facilitar la comparació. Font: Elaboració pròpia.*

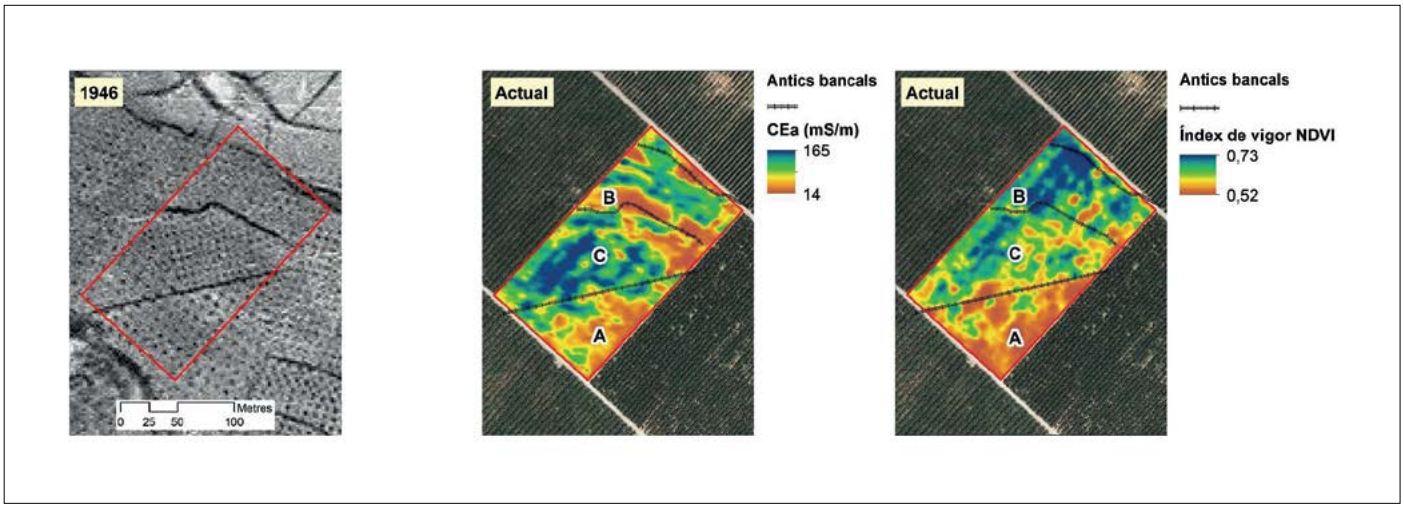


Figura 4. *Comparació de la situació prèvia als moviments de terres per a la creació de noves plantacions fructícoles, i conseqüències sobre la variabilitat de les propietats del sòl i vigor del cultiu (nectarina) en una finca localitzada a Aitona (Segrià). Esquerra: imatge aèria de l'any 1946 en què es veuen plantacions d'ametllers en secà. Centre: conductivitat elèctrica aparent del sòl interpolada a partir de dades del sensor Veris 3100. Dreta: índex de vigor de la diferència normalitzada (NDVI) interpolat a partir de dades extretes d'una imatge aèria multiespectral des d'avioneta. Font: elaboració pròpia.*

En cultius arboris amb reg localitzat, els sensors de CEa, que fan el mapeig entre les files dels arbres, poden no reflectir el que passa en el bulb humit on es desenvolupen les arrels de l'arbre.

Com es veu a l'exemple anterior, la utilització de diverses fonts de dades sobre la variabilitat de les propietats dels sòls i el rendiment o vigor dels cultius, i la seva correcta interpretació, pot ser molt útil per identificar problemes. En aquest cas, no es pot esperar incrementar el potencial productiu de la parcel·la si, almenys, no es millora el drenatge de les parts amb problemes de salinitat. Els problemes de textura poden ser més difícils de solucionar, encara que l'aplicació d'esmenes orgàniques i el reg adaptat amb un subministrament més freqüent d'aigua i fertilitzants podria ser una possible solució.

03.02 Aplicació en cultius arboris

El canvi de l'agricultura tradicional a una més mecanitzada ha afectat també les plantacions fructícoles. Els efectes produïts sobre la variabilitat del sòl en aquestes plantacions no ha estat prou estudiat. En aquests casos, els sensors de CEa poden servir per "radiografiar" el terreny, posant de manifest les transformacions realitzades i la variabilitat induïda en les propietats del sòl.

Un exemple és l'estudi realitzat per Uribeetxebarria et al. (2018) en una plantació de nectarina localitzada en el terme municipal d'Aitona (Segrià). En aquest cas, la transformació de terres realitzada els anys 80 va quedar reflectida en el mapa de la CEa obtingut mitjançant el sensor Veris 3100. La figura 4 és molt il·lustrativa de la situació anterior a la transformació i el posterior efecte sobre la variabilitat de la CEa, com a paràmetre indicatiu d'altres propietats significatives dels sòls (textura, capacitat de retenció d'humitat, salinitat i altres).

Antigament, el cultiu tradicional era en bancals o terrasses, que s'adaptaven a la morfologia del terreny. D'aquesta manera, s'evitava l'erosió i es conservava el sòl i s'afavoria l'emmagatzemament d'aigua, molt important en condicions de secà. Amb la transformació realitzada per a la creació de plantacions intensives de fruiters, es van desfer els bancals, amb conseqüències per a la continuïtat i l'homogeneïtat de les propietats dels sòls. Això queda clarament reflectit en les zones A i B de la figura 4, on es mostra la discontinuïtat que va quedar als sòls després dels moviments de terra per treure els bancals. En particular, en la zona B, la baixa CEa és conseqüència del major moviment de terres, que va fer aflorar elements grollers de roques calcàries amb baixa conductivitat elèctrica i pràcticament nul·la fertilitat fisicoquímica. Els valors de CEa en la zona A es corresponen amb una menor profunditat del sòl, la qual cosa explica el menor desenvolupament dels arbres (fig. 4 dreta). La zona C presenta valors majors de CEa, que indiquen presència de salinitat. Malgrat això, el desenvolupament dels fruiters en aquesta zona és millor, i també en la zona B, contrastant amb les propietats del sòl inferides a partir de la CEa. La raó d'aquesta discrepància la podem trobar en el reg localitzat dels arbres que, per una banda, manté la salinitat fora del bulb humit i, per l'altra, proporciona els nutrients necessaris via fertirrigació. Així, en aquest cas, tot i que era esperable una relació entre el desenvolupament dels arbres i la CEa, aquesta relació no es va trobar.

En conclusió, els sensors de conductivitat elèctrica aparent del sòl (CEa) són, avui per avui, la tècnica que permet fer una millor aproximació a la variabilitat de les propietats del sòl a escala de parcel·la. La CEa és una propietat que pot servir com a "proxy" d'altres propietats d'interès (per exemple, textura, capacitat de retenció d'humitat, capacitat d'intercanvi catiònic, etc.), però la seva correcta interpretació s'ha de basar en el mostreig i l'anàlisi del sòl. La salinitat pot emmascarar la relació entre la CEa i les propietats que afavoreixen el desenvolupament del cultiu i el major rendiment i, per aquest motiu, en alguns casos la relació pot ser inversa. A poc a poc, el major ús d'aquest tipus de sensors farà que hi hagi un millor coneixement de les relacions entre la CEa i les propietats dels nostres sòls. En definitiva, cal esperar que aquesta informació aporti tot un seguit d'avantatges als agricultors que facin ús d'aquesta tecnologia.

Per saber-ne més

www.veristech.com

www.dualem.com

ARNÓ, J., MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J.A., ESCOLÀ, A. (2017) "What sensors tell about the crop environment". *New Ag International,* setembre/octubre, pàgs. 26-32.

URIBEETXEBARRIA, A., DANIELE, E., ESCOLÀ, A., ARNÓ, J., MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J.A., 2018. "Spatial variability in orchards after land transformation: Consequences for precision agriculture practices". *Science of the Total Environment* 635, pàgs. 343–352.

Autoria

José A. Martínez Casasnovas
Grup de Recerca en AgròTICa i Agricultura de Precisió
Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl. Universitat de Lleida – Agrotecnio Center
joseantonio.martinez@udl.cat

Jaume Arnó Satorra
Grup de Recerca en AgròTICa i Agricultura de Precisió
Departament d'Enginyeria Agroforestal. Universitat de Lleida – Agrotecnio Center
jaume.arno@udl.cat

FENOTIPATGE DEL CULTIUS EXTENSIUS mitjançant eines de teledetecció

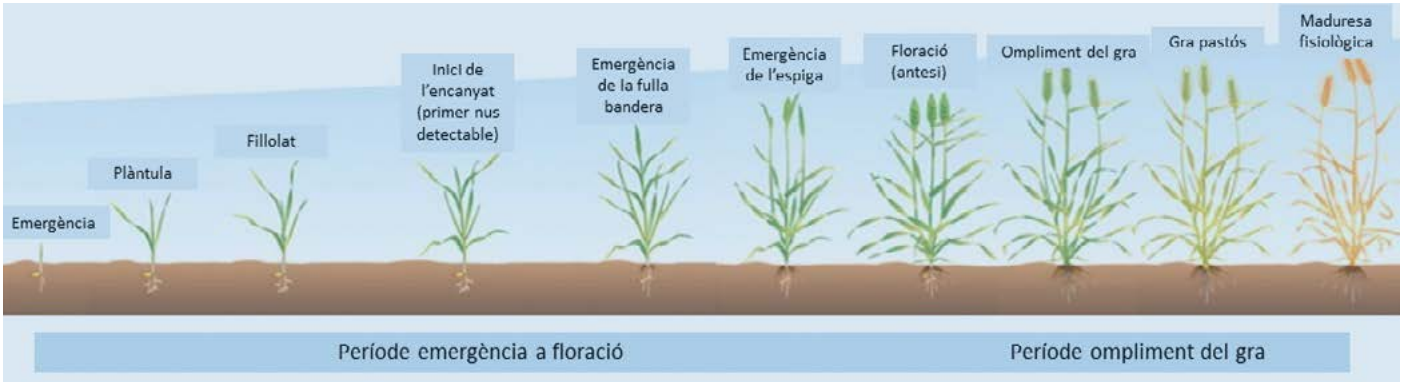


Figura 1. *Representació dels principals estadis del cicle de desenvolupament del blat. Adaptat de: Hunt J, Flohr B, Riffkin P, Richards R, Poole N. (2020). Wheat phenology and the drivers for yield in the high rainfall zone. GRDC- Grain Resarch and Development Corporation.*

01. Introducció

El fenotip d'un cultiu fa referència a aspectes d'aquest que, sent heretables, es mostren d'una determinada forma degut a l'efecte que sobre ells exerceix el medi ambient. El fenotip d'un cultiu inclou aspectes tan diversos com la seva morfologia (e. g. alçada, color de les fulles, forma de la coberta vegetal), fisiologia (e. g. cicle de desenvolupament, estat hídric) o fins i tot productius, com el rendiment o el color del gra.

Qualsevol avaluació fenotípica ha de tenir en compte la naturalesa dinàmica del creixement de les plantes, ja que tant la morfologia del cultiu com les seves característiques fisiològiques depenen del seu estadi de desenvolupament. Com exemple, la figura 1 mostra els principals estadis de desenvolupament del cultiu de blat. La sembra del blat es realitza normalment a la tardor i la planta passa pels estadis de plàntula, fillolat, encanyat, espigat, floració i ompliment del gra. La floració és un estadi crític, ja que suposa la fi del creixement de l'aparell vegetatiu de la planta i l'inici de la formació del gra.

02. La teledetecció aplicada al Fenotipatge dels cultius extensius

L'objectiu de l'ús de tecnologies com la teledetecció és fenotipar un elevat nombre de genotips de diferents cultius, per exemple per seleccionar aquells que millor poden adaptar-se a un clima canviant amb falta de recursos hídrics. Algunes de les característiques fenotípiques del blat i altres cultius extensius es poden determinar mitjançant tècniques de teledetecció, que es basen en informació sobre la radiació reflectida o transmesa pel cultiu en diferents franges de l'espectre electromagnètic. Aquesta tecnologia es fonamenta en el principi que l'absorció de llum de la coberta vegetal en longituds d'ona específiques de l'espectre electromagnètic està relacionada amb certes característiques morfològiques o fisiològiques del cultiu. L'espectre de reflectancia (ρ) de la coberta vegetal es captura a diferents longituds d'ona

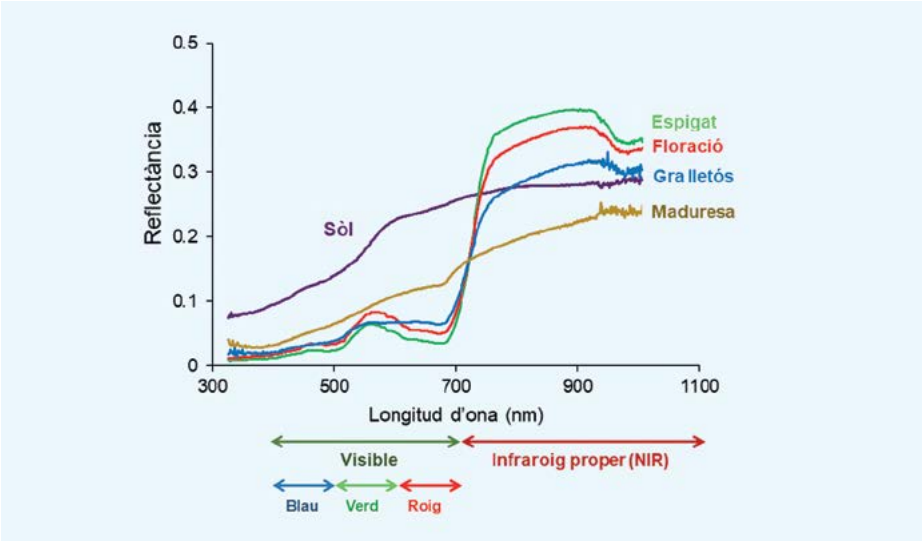


Figura 2. *Exemple de l'espectre de reflectància del sòl i del blat en diferents estadis de desenvolupament. Font: elaboració pròpia.*

(λ), dins de les franges visible (VIS, 400 a 700 nm) i infraroig proper (NIR, 700 a 1300 nm) de l'espectre electromagnètic (fig. 2). L'espectre de reflectància a les longituds d'ona de la franja visible depèn de l'absorció de radiació incident de la clorofil·la i altres pigments associats, com carotenoids i antocianines, que es localitzen a les parts verdes de les plantes. La reflectància del cultiu és molt baixa a les longituds d'ona de les franges blau (400-500 nm) i roig (600-700 nm) de l'espectre, ja que s'hi troben els pics d'absorció de la clorofil·la. Per damunt dels 700 nm, dins de la regió de l'infraroig proper, la reflectància és alta, ja que no hi ha absorció per part dels pigments de la planta. Per tant, l'espectre de reflectancia depèn de la superficie fotosintètica de la coberta vegetal, que està directament relacionada amb l'estadi de desenvolupament fenològic del cultiu, tal com mostra la figura 2.

Les diferents característiques del cultiu es poden estimar a través de diversos índexs de reflectància. Aquests utilitzen fórmules basades en operacions matemàtiques simples, com a quocients o diferències entre les reflectàncies en longituds d'ona específiques, dissenyades per a destacar el vigor i les propietats de la vegetació (biomassa de la coberta vegetal, radiació absorbida, contingut de clorofil·la, etc.) La majoria d'índexs utilitzen longituds d'ona en la franja dels 400 als 900 nm i el més freqüent és utilitzar-los per a la determinació de característiques de les plantes relacionades amb la grandària de la coberta vegetal.

03. Sensors i plataformes més recomanables per a teledetecció en cultius extensius

Els sensors de teledetecció més utilitzats pel fenotipatge del blat i dels cultius extensius en general són els sensors tèrmics, sensors espectroradiomètrics en les franges VIS i NIR (incloent-hi imatges multiespectrals i hiperespectrals) i la fotografia digital convencional o sensors RGB (de l'anglès Red-Green-Blue). Existeixen també sensors LIDAR (de l'anglès "Laser Imaging Detection and Ranging") que són capaços d'obtenir dades d'alçada o volum de les plantes a més de crear models tridimensionals d'alta resolució. Entre els tipus principals es troben els espectreradiòmetres de camp, que són capaços de captar tota la informació espectral en un punt, i els radiotermòmetres, que mesuren la temperatura mitjana instantània d'una zona del terreny. Les càmeres multiespectrals o hiperespectrals graven la informació d'un gran nombre de bandes de l'espectre en format d'imatge i les càmeres tèrmiques mesuren la temperatura de la zona observada i la mostren en format imatge. La figura 3 mostra un exemple d'imatges obtingudes amb sensors col·locats a bord d'un dron en una plataforma de fenotipatge. Finalment, els satèl·lits concentren un gran nombre de sensors amb informació d'un ampli nombre de bandes, més enllà de les bandes de les franges visible i tèrmic l'espectre, tot i que són aquestes les que interessen pel fenotipatge dels cultius. Tot aquest tipus de sensors es poden utilitzar a peu de parcel·la (espectreradiòmetres i radiotermòmetres), poden col·locar-se sobre plataformes aèries com avionetes o drons (càmeres multiespectrals i tèrmiques), o formar part de la infraestructura de satèl·lits.

Les plataformes de fenotipatge basades en teledetecció són principalment de dos tipus (fig. 4). Per una banda, existeixen plataformes instal·lades dins d'un hivernacle en les quals els testos que contenen les plantes es desplacen automàticament fins a la zona on es troben els sensors que mesuren les propietats de les plantes. Un exemple d'aquest tipus és la plataforma Phenoarch de l'INRA a Montpeller (França). Hi ha també plataformes a l'aire lliure en què les dades es capturen mitjançant sensors muntats en robots, grues o drons. Exemples d'aquest tipus són les plataformes Phenomobile del CSIRO a Canberra (Austràlia) o el Field Scanalyzer de Rothamsted Research a Harpenden (Regne Unit).

Entre les aplicacions més útils de la teledetecció en cultius extensius es troben les estimacions dels estats nutricional i hídric de la coberta vegetal, a les quals es dediquen les properes seccions.

04. fenotipatge de l'estat nutricional del cultiu

Els índexs de vegetació a partir d'imatges remotes proporcionen informació pràctica sobre el vigor dels cultius i

Figura 3. *Exemples d'informació obtinguda amb dron en una plataforma de fenotipatge de blat dur. Imatge RGB(a), índex NDVI (b) i imatge tèrmica (c). Font: IRTA.*

Figura 4. *Exemple de plataformes de fenotipatge. Phenoarch (a), dins d'un hivernacle, Phenomobile (b) i Field Scanalyzer (c) al camp. Font: Phenoarch INRA (Montpelllier, Francia), CSIRO (Camberra, Australila) i Rothamsted Research (Harpenden, UK).*

són útils a l'hora d'estimar diferències de desenvolupament entre varietats o genotips. Hi ha una gran quantitat d'índexs de reflectància, que en general es basen en el fet que la vegetació sana presenta baixa reflectància en les regions blau (ρBLUE sobre els 475 nm) i roig (ρRED al voltant dels 680 nm) de l'espectre, mentre que té un pic en la regió del verd (ρGREEN sobre els 560 nm). A més, en el rang NIR (ρNIR sobre els 850 nm) la reflectància és molt més gran que la de la banda visible (fig 2). Entre els índexs més utilitzats i recomanats per estimar característiques de les plantes relacionades amb la grandària de l'aparell fotosintètic de la coberta vegetal es troben NDVI, GNDVI, SAVI i MTVI2 (taula 1).

L'Índex Normalitzat de Diferències de Vegetació (NDVI de l'anglès "Normalized Difference Vegetation Index") oscil·la entre –1,0 i 1,0. Els valors positius d'aquest índex indiquen un augment en la verdor i els valors negatius s'associen amb superfícies no vegetals, com aigua, àrees àrides, gel, neu o núvols. El rang comú per a la vegetació verda és de 0,2 a 0,9. Els valors més elevats (entre 0,6–0,9) indiquen cultius amb un vigor adequat.

L'índex GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index) es calcula de manera similar al NDVI, però usant la banda del verd en lloc de la banda del roig. Aquest índex, que varia entre 0 i 1, proporciona informació de la fracció de radiació fotosintèticament absorbida pel cultiu i es correlaciona linealment amb l'índex d'àrea foliar (LAI de l'anglès "Leaf Area Index" que es defineix com la quantitat d'àrea foliar per unitat d'àrea de superfície de sòl, m^2/m^2) i la biomassa. Per tant, l'índex GNDVI és més sensible a la concentració de clorofil·la que l'índex NDVI.

El SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) és una variant de l'índex NDVI que té en compte l'efecte del sòl. Aquest índex ha estat dissenyat per àrees on la coberta vegetal és pobra i queda exposada la superfície del sòl. En el càlcul del SAVI (que varia entre –1 i 1), s'introdueix el valor del paràmetre L (que també varia entre -1 i 1) que s'estima en funció de la proporció de la superfície vegetal en l'àrea d'interès. S'apliquen valors baixos de L a cultius amb una alta densitat de vegetació i viceversa.

Una de les febleses dels índexs basats en la banda NIR és que mostren saturació quan la densitat del cultiu és alta. Per aquest motiu, s'han desenvolupat índexs que inclouen en el seu càlcul informació de la banda del roig mitjà (Red Edge, al voltant dels 700 nm), que corregeixen aquest efecte no desitjat. Entre ells el més utilitzat és el MTVI2 (Modified Transformed Vegetation Index), que varia entre 0 i 1) i es basa en imatges multiespectrals adquirides en les bandes NIR, verd i roig mitjà de l'espectre electromagnètic.

05. Fenotipatge de l'estat hídric del cultiu

L'estudi mitjançant eines de teledetecció de les diferències de comportament de varietats o genotips front l'estrès hídric es pot basar en índexs que utilitzen imatges tèrmiques (que es mencionen en altres articles d'aquests *Dossier Tècnic*), o bé en índexs que es fonamenten en el fet de que la reflectància dels teixits vegetals augmenta a mesura que disminueix el contingut d'aigua de les cèl·lules. A continuació es mostren alguns exemples d'aquests darrers índexs de reflectància associats al contingut hídric dels cultius. La forma de calcular-los es troba a la taula 2.

Índex	Fórmula
NDVI (Normalized Difference VI)	$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}}$
GNDVI (Green Normalized Difference VI)	$GNDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{GREEN}}{\rho_{NIR} + \rho_{GREEN}}$
SAVI (Soil Adjusted VI)	$SAVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED} + L} * (1 + L)$
MTVI2 (Modified Transformed VI)	$MTVI_2 = \frac{1.5[1.2(\rho_{NIR} - \rho_{GREEN}) - 2.5(\rho_{R\,EDGE} - \rho_{GREEN})]}{\sqrt{(2\rho_{NIR} + 1)^2 - (6\rho_{NIR} - 5\sqrt{\rho_{R\,EDGE}}) - 0.5}}$

Taula 1. *Índexs de vegetació (VI) recomanats com a indicadors de l'estat nutricional dels cultius. Font: elaboració pròpia.*

Índex	Fórmula
WI (Water Index)	$WI = \frac{\rho_{900}}{\rho_{970}}$
NDWI (Normalized Difference Water Index)	$NDWI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{SWIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{SWIR}}$
PRI (Photochemical Reflectance Index)	$PRI = \frac{\rho_{570} - \rho_{531}}{\rho_{570} + \rho_{531}}$
WABI (Water Balance Index)	$WABI = \frac{\rho_{1500} - \rho_{531}}{\rho_{1500} + \rho_{531}}$

Taula 2. *Índexs de vegetació (VI) recomanats com a indicadors de l'estat hídric dels cultius extensius. Font: elaboració pròpia.*

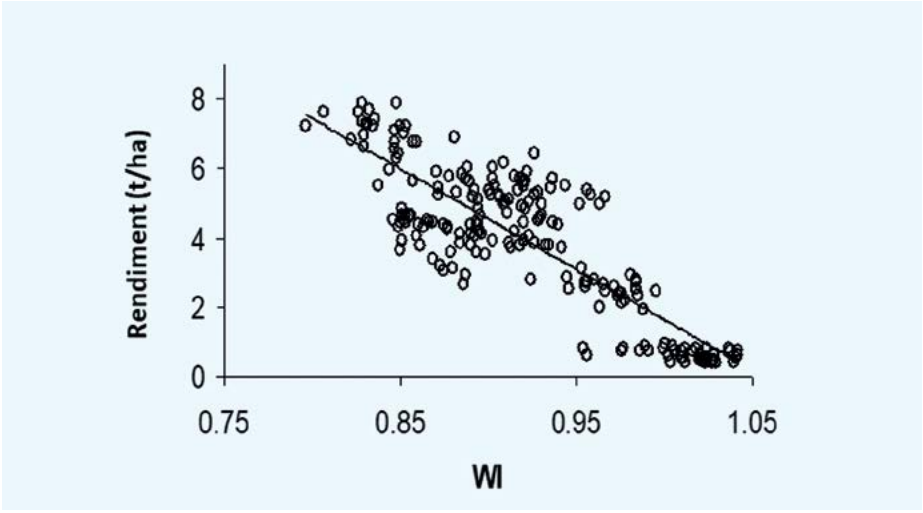


Figura 5. *Relació entre l'índex d'aigua (WI) mesurat en l'estadi de gra lletós en un conjunt de línies de blat dur. Cada punt representa el valor mitjà d'una línia en cadascun de nou ambients. Font: Royo et al. 2015*

Un dels índexs més emprats en cereals per ser un bon indicador de l'estat hídric de la coberta vegetal és l'índex d'aigua (WI, de l'anglès "Water Index") i diverses modificacions d'aquest. El WI és la ràtio entre la reflectància a una longitud d'ona de 970 nm, sensible al contingut d'aigua de la coberta vegetal, i la reflectància a 900 nm, en la qual l'absorció de l'aigua és nul·la. En cultius ben hidratats el WI pren valors menors que 1, apropant-se tant més a aquest valor quant menor és el contingut d'aigua dels teixits vegetals. Per aquest motiu, s'ha relacionat negativament amb el rendiment del blat en diversos estudis (fig. 5).

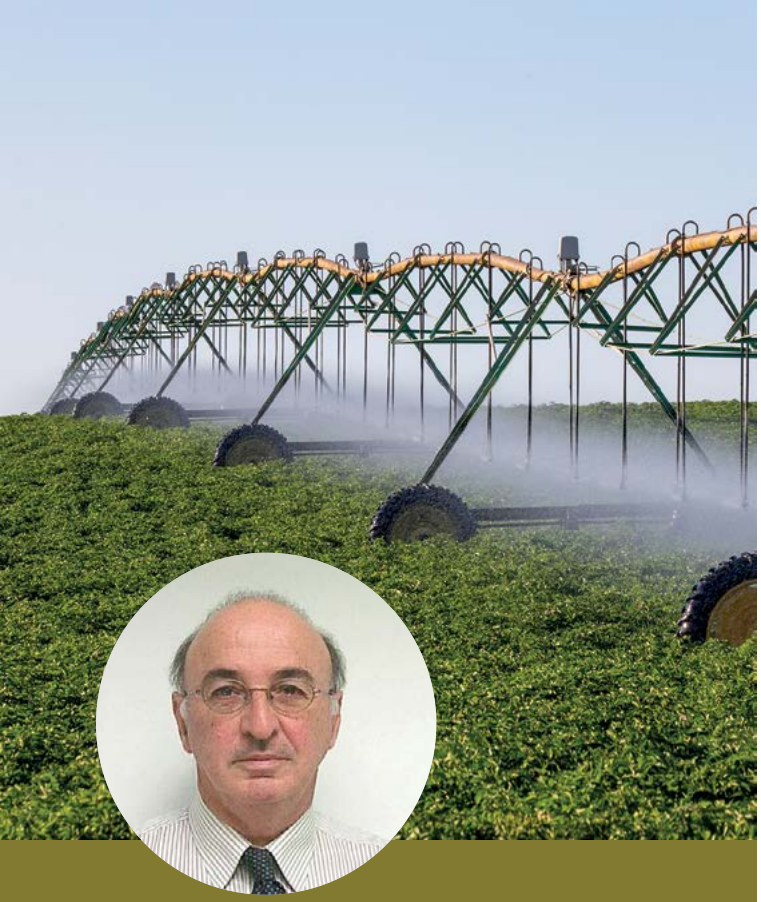
A més del WI, la bibliografia científica recomana altres índexs, com l'Índex Normalitzat de Diferències d'Aigua (NDWI, de l'anglès "*Normalized Difference Water Index*"), que relaciona el contingut d'aigua de la coberta vegetal amb la reflectància en les bandes de l'infraroig proper (NIR) i de l'infraroig d'ona curta (SWIR), i que es basa en l'absorció d'energia de l'aigua de la fulla en el SWIR. Les bandes del SWIR reflecteixen els canvis tant en el contingut d'aigua de la vegetació como en l'estructura esponjosa del mesòfil en les cobertes vegetals, mentre que la reflectància NIR es veu afectada per l'estructura interna de la fulla i el seu contingut de matèria seca, però no pel contingut d'aigua. La combinació de NIR i SWIR elimina les errades induïdes per l'estructura interna de la fulla i el seu contingut de matèria seca, millorant així la precisió en l'estimació del contingut d'aigua de la coberta vegetal.

També s'utilitza freqüentment com a indicador de l'estrès hídric dels cultius l'índex de reflectància fotoquímica de la coberta vegetal (PRI, de l'anglès "*Photochemical Reflectance Index*"). PRI es basa en la reflectància en les bandes de 531 nm i 570 nm de longitud d'ona i és sensible als canvis diürns en els indicadors fisiològics de l'estrès hídric. Finalment, l'índex de balanç d'aigua de banda estreta (WABI, de l'anglès "*Water Balance Index*"), es basa en canvis de reflectància deguts a variacions en el contingut d'aigua de les plantes en les longituds d'ona de 1.500 nm i 531 nm. Aquest índex s'utilitza freqüentment en la programació del reg de la vinya.

Autoria

David Gómez Candón
IRTA – Programa Ús Eficient de l'Aigua en Agricultura – Lleida
david.gomez@irta.cat

Conxita Royo i Calpe
IRTA – Programa Cultius Extensius Sostenibles – Lleida
conxita.royo@irta.cat



L'aigua té tant valor que no té preu

Elías Fereres és doctor enginyer agrònom de la Universitat Politècnica de Madrid i doctorat (Ph.D.) en Ecologia a la Universitat de Califòrnia, Davis (EUA). És actualment catedràtic emèrit d'agronomia a la Universitat de Còrdova i investigador de l'Institut d'Agricultura Sostenible del CSIC. És acadèmic numerari i ha estat president de la Reial Acadèmia d'Enginyeria d'Espanya (2011-2019).

El doctor Elías ha tingut una important activitat en l'àmbit internacional, ha estat consultor del Banc Mundial, UNESCO, i nombroses vegades per la FAO en més de 20 països. Els seus treballs d'investigació versen sobre la ciència i l'enginyeria de l'aigua; en relació amb l'agricultura i l'ambient en diversos temes com l'adaptació de les plantes a la sequera, la conservació de l'aigua i el sòl, el maneig sostenible dels recursos naturals, el reg deficitari i la productivitat de l'aigua en els sistemes agrícoles. Ha publicat més de 180 articles en revistes internacionals i nombrosos capítols de llibres.

Parlem amb Elías Fereres

Acadèmic numerari de la Reial Acadèmia d'Enginyeria d'Espanya

El reg de precisió consisteix a aplicar dotacions variables a diferents parts dins d'una unitat de reg que prèviament es manejava de manera homogènia. Aquest sistema permet optimitzar l'aigua i adaptar-la a cada cultiu i parcel·la de la manera més eficient. Parlem amb el doctor Elías Fereres, enginyer agrònom, acadèmic numerari de la Reial Acadèmia d'Enginyeria d'Espanya i un dels estudiosos més rellevants sobre enginyeria de l'aigua sobre el present i futur del regadiu al nostre país.

En la seva llarga trajectòria professional, ha vist i viscut l'evolució del regadiu a Espanya i al món. D'on venim i cap a on anem?

A escala global, la productivitat mitjana del regadiu és dues vegades i mitja la del secà, de manera que el regadiu produeix el 40% dels aliments en el 17% de la superfície conreada del planeta. Això ha dut a una expansió del regadiu molt notable amb un creixement en la superfície regada mundial del 3% anual des de 1960, fins a arribar als 340 milions d'hectàrees regades a l'actualitat. És dubtós que continuï l'expansió del regadiu perquè l'agricultura de reg

està limitada cada vegada més per la disponibilitat de recursos hídrics. Les restriccions econòmiques i ecològiques fan que es vagi frenant l'expansió del regadiu mundial, si bé hi ha ara oportunitats d'expansió en l'únic continent on això és possible, l'Àfrica, on encara hi ha un potencial de creixement del regadiu important.

"És dubtós que continuï l'expansió del regadiu perquè l'agricultura de reg està limitada cada vegada més per la disponibilitat de recursos hídrics"

Quin valor té l'aigua i quina és la necessitat de gestionar-la eficientment?

Jo he dit alguna vegada que l'aigua té tant valor que no té preu. L'aigua és un recurs natural renovable, cosa que de vegades s'oblida, però en les zones àrides i semi-àrides del planeta és molt escassa i ha de ser utilitzada tan eficientment com sigui possible. En aquestes zones, l'agricultura del reg usa més del 70% dels recursos derivats per als diferents usos (en alguns països fins al 90%) i, per tant, ha d'intentar assolir una alta eficiència en el seu conjunt, ja que un petit estalvi percentual representa un volum d'aigua molt important. Convé diferenciar aquí entre ús i consum d'aigua; el regadiu fa servir aigua que es perd en una part i una altra part es consumeix en evaporació. La part que es perd pot recuperar-se i ser reutilitzada aigües avall, de manera que no es perd realment en el conjunt de la conca hidrogràfica. Per això, abans d'invertir a millorar l'eficiència per reduir aquestes pèrdues, convé conèixer la hidrologia de la conca en profunditat.

"L'aigua és un recurs natural renovable, cosa que de vegades s'oblida, però en les zones àrides i semi-àrides del planeta és molt escassa i ha de ser utilitzada tan eficientment com sigui possible"

Diversos indicadors fan entreveure que els cicles de les precipitacions variaran, i seran menys i més intenses. Això pot suposar un problema en un país com Espanya?

Els registres de pluges de la península Ibèrica més antics (més de 170 anys) no indiquen que hi hagi una tendència fiable pel que fa a menor quantitat ni major intensitat en les precipitacions. Així com hi ha evidència mesurada de l'escalfament global, els models hidrològics relacionats amb el canvi climàtic són molt menys fiables i ofereixen molta més incertesa, sobretot a escala regional. Però Espanya ja té un problema hídric important, amb independència dels endevins. Des de 1990, el regadiu ha tingut una expansió notable, de 3 a 3,7 milions d'hectàrees i, alhora, s'ha contret l'ús de l'aigua d'aquest regadiu. Espanya ha fet un esforç de modernització molt important per reduir l'ús de l'aigua de reg, però les conques on el regadiu té major rendibilitat (totes les de Llevant, el Guadiana i el Guadalquivir) estan sotmeses a una escassetat d'aigua tal que les dotacions assignades al reg en un any mitjà ja no es poden reduir més si volem mantenir l'alta productivitat de la nostra agricultura de reg. Tot i això, els cicles de sequera que ens seguiran assotant obligaran a restriccions importants per a les quals cal estar preparats, i és aquí on totes les noves tècniques de digitalització i el reg de precisió obriran nous camps d'aplicació. És imperatiu preparar-se per a un futur d'escassetat d'aigua per a l'agricultura.

"És imperatiu preparar-se per a un futur d'escassetat d'aigua per a l'agricultura"

L'agricultura de precisió genera multitud de dades de sensors al camp i sensors remots, entre d'altres. Com es gestiona aquest gran volum d'informació i com es trasllada a l'agricultor per a la presa de decisions?

La digitalització de l'agricultura encara és a les beceroles. Les noves possibilitats que ofereixen l'ús de megadades (Big Data), tot tipus de sensors, models de simulació, etc., són extraordinàries i han d'obrir nous camps on la gestió de tota la informació es farà per sistemes experts que oferiran als agricultors noves opcions per intensificar encara més la seva producció, però d'una manera sostenible. Igualment, oferiran solucions en situacions extremes, com les sequeres, per augmentar la resiliència dels sistemes agrícoles. L'agricultor no té temps de processar i valorar tota la informació que avui té a la seva disposició; s'han d'oferir nous serveis i noves eines d'ajuda a la presa de decisions que siguin amigables i de fàcil ús.

Què és per a vostè el reg de precisió i quines eines creieu que són necessàries per fer-ho?

El reg de precisió consisteix a aplicar dotacions variables a diferents parts dins d'una unitat de reg (parcel·la) que prè-

viament es manejava de manera homogènia. Aquestes dotacions varien segons la informació espacial recollida que indica les distintes necessitats de les diverses zones de la parcel·la. Ja hi ha sistemes de reg de pivot central capaços d'una aplicació variable en diverses zones del cercle regat. En aquest cas, com en molts altres de la ciència i tecnologia, l'enginyeria va per davant de la ciència, ja que el que encara no es coneix bé són les causes de les variacions intraparcel·la en les seves necessitats hídriques.

Per poder executar un reg espacialment variable, cal disposar d'informació espacial precisa sobre l'estat hídric del cultiu; d'aquí la necessitat d'usar sensors propers i remots que diagnostiquin la situació. Una vegada que aquesta informació és consistent en el temps, serà possible zonificar la parcel·la en diferents unitats de reg i canviar l'enginyeria de sistema de reg per aplicar l'aigua precisa en cada unitat. La pregunta clau és si aquesta nova inversió en reg de precisió pot ser rendible per a l'agricultor. Per a això, cal augmentar la recerca sobre documentar els beneficis econòmics i ambientals, i combinar experimentació i models de simulació. Recentment, Bellvert i altres han aportat una informació molt valuosa sobre els beneficis del reg de precisió en una vinya, un dels cultius més interessants per aplicar aquesta nova tècnica.

Equivocadament, s'ha anomenat també reg de precisió a un reg homogeni on la programació es fa amb sensors, un pràctica que es va desenvolupar fa més de 70 anys amb els tensiòmetres a Califòrnia i que continua practicant-se amb altres sensors d'humitat de sòl i de planta en l'actualitat. La recerca en aquest àmbit va començar fa més de 10 anys, basada en ús de drons per caracteritzar la temperatura dels cultius. Avui, els avenços en l'ús de satèl·lits ofereixen noves opcions per progressar en una implementació del reg de precisió que sigui econòmicament viable.

> "En el futur, la programació tècnica dels regs es generalitzarà, a causa de les pressions a què se sotmetrà el regadiu per demostrar que l'aigua es fa servir de manera òptima"

> "Per poder executar un reg espacialment variable, cal disposar d'informació espacial precisa sobre l'estat hídric del cultiu; d'aquí la necessitat d'usar sensors propers i remots que diagnostiquin la situació"

En el futur, qui decidirà l'aigua a aplicar, l'agricultor o el sistema que gestiona les dades de camp?

El reg automàtic es va inventar fa molts anys, però són molt pocs els regants que el fan servir sense una retroalimentació freqüent per ajustar els programes a les necessitats locals de les seves parcel·les. A mesura que es desenvolupen solucions de programació més competitives, l'adopció d'aquestes tècniques va creixent, sobretot en cultius d'alt valor afegit i en situacions d'aigua cara i/o escassa. Tot i que en la major part dels regadius del món el regant pren les decisions basades en la seva experiència o en la disponibilitat d'aigua per a regar, en el futur, la programació tècnica dels regs es generalitzarà a causa de les pressions a què se sotmetrà el regadiu per demostrar que l'aigua es fa servir de manera òptima.

Generalitat de Catalunya
Departament d'Agricultura,
Ramaderia, Pesca i Alimentació

xarxa-i.cat
Xarxa d'Innovació agroalimentària
i rural de Catalunya

IRTA

ISSN: 1699-5465
D.L.: B-16786-05