

# Aigua i producció d'aliments. Per què els cultius necessiten aigua?

Joan Girona,<sup>1</sup> Josep M. Villar<sup>2</sup>

1. Programa d'Ús Eficient de l'Aigua en Agricultura, Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries (IRTA), Lleida

2. Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl, Universitat de Lleida (UdL)

REBUT: 11 DE GENER DE 2021 · ACCEPTAT: 15 DE FEBRER DE 2021

---

## RESUM

---

Aquest article explica el paper de l'aigua en el comportament general de les plantes i, en concret, la seva rellevància en l'agricultura, amb l'objectiu que els lectors, no especialitzats en aspectes fisiològics, entenguin la importància del recurs de l'aigua en la producció d'aliments i béns. Per a fer-ho, s'analitzen els conceptes més rellevants que governen el funcionament de l'aigua a la planta i la relació amb els processos més lligats a la producció (fotosíntesi i creixement vegetatiu). Per a il·lustrar aquests conceptes es presenten alguns exemples agrònomic relacionats amb la sensibilitat estacional al dèficit hídric, l'eficiència en l'ús de l'aigua o la dependència de la producció d'aliments a la disponibilitat d'aigua.

**PARAULES CLAU:** aigua, producció d'aliments, fisiologia vegetal, potencial hídric, fotosíntesi, transpiració, sensibilitat estacional al dèficit hídric.

Correspondència: Joan Girona. Programa d'Ús Eficient de l'Aigua en Agricultura, Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries (IRTA). Fruitcentre, Parc de Gardeny, 25003 Lleida (Segrià). A/e: [Joan.Girona@irta.cat](mailto:Joan.Girona@irta.cat).

## Agua y producción de alimentos. ¿Por qué los cultivos necesitan agua?

---

### RESUMEN

---

Este artículo explica el papel del agua en el comportamiento general de las plantas y, en concreto, su relevancia en la agricultura, con el objetivo de que los lectores, no especializados en aspectos fisiológicos, puedan entender la importancia del recurso del agua en la producción de alimentos y bienes. Para ello, se han analizado los conceptos más destacados que gobiernan el funcionamiento del agua en la planta y su relación con los procesos más vinculados a la producción (fotosíntesis y crecimiento vegetativo). Para ilustrar estos conceptos se presentan algunos ejemplos agronómicos relacionados con la sensibilidad estacional al déficit hídrico, la eficiencia en el uso del agua o la dependencia de la producción de alimentos a la disponibilidad de agua.

**PALABRAS CLAVE:** agua, producción de alimentos, fisiología vegetal, potencial hídrico, fotosíntesis, transpiración, sensibilidad estacional al déficit hídrico.

## Water and food production. Why crops need water?

---

### ABSTRACT

---

This paper explains the role of water in the general behaviour of plants and more specifically its importance in agriculture, with the aim to let the reader who is not specialized in physiological aspects understand the function of water in the production of food and goods. To do this, the most significant concepts regulating the behaviour of water inside the plant have been analysed, together with the relationship of water with the processes most closely linked to production (photosynthesis and vegetative growth). Likewise, to illustrate these concepts, some agronomic examples are given in relation to seasonal sensitivity to water deficit, water use efficiency, and the dependence of food production on water availability.

**KEYWORDS:** water, food production, plant physiology, water potential, photosynthesis, transpiration, seasonal sensitivity to water deficit.

## 1. Introducció

Que l'aigua és un recurs bàsic en les nostres vides és quelcom que tothom té assumit, i que és un recurs essencial en la producció d'aliments, en els entorns lligats a les plantes, com l'agrari, la jardineria, la forest, el medi ambient, etc., ningú no ho dubta. No obstant això, sovint es desconeixen les bases fisiològiques que expliquen aquesta importància, i que donen les claus per a millorar-ne l'ús.

La fotosíntesi i el creixement són els dos processos que fonamenten la producció de biomassa, en els quals l'aigua és vital. L'objectiu d'aquest treball és descriure esquemàticament aquests processos, com afecten els cultius i la seva productivitat, cosa que permetrà entendre per què l'aigua és imprescindible per a les plantes i per a la producció d'aliments.

## 2. Conceptes fisiològics lligats al comportament de l'aigua a les plantes

L'aigua és necessària en quantitats molt petites per a fer la síntesi de glucosa a escala cel·lular i per a molts altres processos bioquímics, i la major part de l'aigua líquida absorbida es vaporitza i retorna a l'atmosfera. En la majoria de conreus, més del 95 % de l'aigua que absorbeixen les arrels es retorna a l'atmosfera en forma de vapor, i en alguns casos supera el 99,5 %. En aquest apartat es descriuen totes les funcions i els processos en què l'aigua intervé en una quantitat important. Primer, es descriuen les forces que governen el moviment de l'aigua dintre de la planta; tot seguit, s'analitzen els dos processos d'intercanvi de gasos en què l'aigua és un element essencial —la transpiració i la fotosíntesi— i, finalment, s'explica el paper dels estomes en aquests intercanvis de gasos i la funció de refrigeració que s'aconsegueix amb la transpiració. Donat que l'estat hídric de la planta té un paper determinant en el seu creixement, al final de l'apartat s'analitza aquesta dependència.

### 2.1. Moviment de l'aigua en el contínuum sòl-planta-atmosfera

El moviment de l'aigua des del sòl fins a l'atmosfera, i el seu camí per l'interior de la planta, es produeix bàsicament per un procés passiu degut a la diferència de potencial entre dos punts. El potencial hídric ( $\Psi_h$ ) és l'energia de l'aigua en un punt determinat, i, tot i que la comparació no és estrictament certa, es pot entendre la força amb què una matriu (el sòl, els teixits vegetals i l'atmosfera) reté les molècules d'aigua. Com menys quantitat

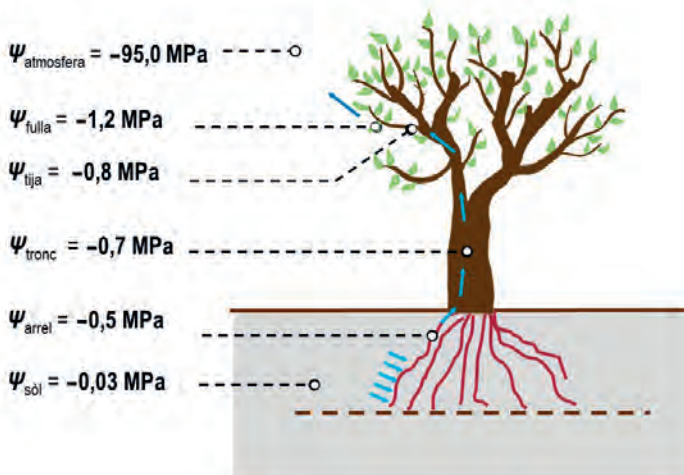
d'aigua contingui una matriu, aquesta la retindrà amb més força. Per tant, l'aigua és mourà des del punt en què està retinguda amb menys força fins al punt en què està retinguda amb més força per tal de buscar l'equilibri o la diferència zero, o quasi zero, entre els dos punts. Aquesta energia de l'aigua en un punt la podem mesurar en megapascals (MPa).

La figura 1 il·lustra aquest moviment, mostra el gradient de potencials que permet que l'aigua es desplaci del sòl a les arrels, perquè dintre de les arrels hi ha un  $\Psi_h$  més negatiu (-0,5 MPa) que al sòl (-0,03 MPa). En aquest trànsit, l'aigua ha hagut de superar una barrera: la resistència que posa l'epidermis i les primeres cèl·lules del còrtex de l'arrel fins a arribar al xilema. Per tant, la diferència de  $\Psi_h$  ha de ser suficient per a superar aquesta resistència. Quan l'aigua es mou entre dos punts del sòl que són a la mateixa altura, la diferència entre  $\Psi_h$  es deu a la diferència entre potencials matricials  $\Psi_m$  (la força amb què la matriu, en aquest cas el sòl, reté l'aigua); per tant, s'admet que  $\Psi_h = \Psi_m$ . En entrar l'aigua a l'arrel, el  $\Psi_h$  és més baix perquè a l'interior de l'arrel hi ha soluts dissolts amb els líquids, i així, a més del potencial matricial,  $\Psi_m$ , el potencial osmòtic,  $\Psi_s$ , té un paper important. En aquest cas, s'assumeix que  $\Psi_h = \Psi_m + \Psi_s$ .

En el pas de l'arrel cap al tronc, l'aigua, a més de travessar els conductes del xilema, on troba resistències de moviment, ha de pujar i vèncer la component altura,  $\Psi_g$ , que té

**FIGURA 1**

Esquema del moviment de l'aigua en el continuïum sòl-planta-atmosfera



FONT: Elaboració pròpia.

un paper diferent en la definició del potencial (1), ja que l'altura infereix una força de  $-0,1$  MPa per metre. Igual passa en el moviment del tronc a la tija i de la tija a la fulla. Finalment, quan l'aigua passa de la fulla a l'atmosfera (transpiració), el gradient de potencials és molt alt, de manera que si la fulla no tingués mecanismes de protecció, es dessecaria incontroladament.

$$\Psi_h = \Psi_m + \Psi_s + \Psi_g \quad (1)$$

El potencial hídic ( $\Psi_h$ ), com s'explica més endavant, té molta incidència en altres processos importants (transpiració, fotosíntesi, creixement vegetatiu...) i si presenta valors molt negatius limita de manera considerable aquests processos. Quan això passa, es diu que la planta està sotmesa a un *dèficit hídic*. A tall d'exemple, un ametller que presenta valors de  $\Psi_h$  propers a  $-1,0$  MPa al migdia i en ple estiu, es considera que no presenta *dèficit hídic*, agronòmicament parlant; si els valors fossin propers a  $-1,6$  MPa, s'estaria davant d'un *dèficit hídic* moderat alt, i si fossin de  $-2,5$  MPa, davant d'un *dèficit hídic* molt sever, que si es perllongués en el temps portaria a la caiguda de fulles de l'ametller.

## 2.2. La transpiració

La transpiració és el procés pel qual l'aigua, bàsicament de les fulles, passa a l'atmosfera, ja sigui per evaporació (la major part) o per difusió. El gran paradigma de la transpiració és que l'aigua a la fulla es troba a un potencial molt menys negatiu que el del vapor de l'aigua de l'atmosfera; per tant, si no es pogués controlar, aquest pas seria molt ràpid i tendria a dessecar les fulles i, per la seva connexió, tota la planta. Els estomes de les fulles (obertures micromètriques) tenen la capacitat d'obrir-se i tancar-se, i regulen, així, l'evaporació d'aigua de la planta.

La transpiració té una sèrie de conseqüències molt interessants per a les plantes:

— La primera és la baixada de temperatura que experimenta la planta en evaporar-se l'aigua de la seva superfície (per a evaporar 1 g d'aigua a  $20$  °C s'absorbeix una energia equivalent a 2,45 kJ [586 cal]). Com que les plantes evaporen volums importants d'aigua, tant les fulles com l'ambient proper es refreden de manera considerable.

— La segona és la creació del gradient de potencial. Perquè el gradient que s'observa a la figura 1 es mantingui, el sistema ha de tenir una fuga (en cas contrari, tendria a buscar l'equilibri). La transpiració manté aquest gradient, el qual permet, en bona part, la circulació dels nutrients i d'altres components dins de la planta.

— La tercera és l'entrada de diòxid de carboni ( $\text{CO}_2$ ). Per on surt l'aigua evaporada entra el  $\text{CO}_2$ , que es fixarà en forma d'hidrats de carboni per mitjà de la fotosíntesi.

És precisament la relació entre transpiració i fotosíntesi la que permet quantificar l'aigua que ha de transpirar una planta per a produir una determinada biomassa. En general, les plantes transpiren molta més aigua que el  $\text{CO}_2$  que pot entrar pels estomes. Per cada àtom de carboni que es fixa, les plantes transpiren entre 100 i 400 molècules d'aigua (Bailey-Serres *et al.*, 2019). Això és deu a dos fets: d'una banda, que el pes de la molècula d'aigua és inferior que la de  $\text{CO}_2$ , cosa que li confereix més capacitat per a moure's (més velocitat de difusió), i, de l'altra, que la concentració del vapor d'aigua a l'atmosfera és molt superior (de 0,3 a  $1,4 \text{ mol m}^{-3}$ ) a la del  $\text{CO}_2$  ( $0,0156 \text{ mol m}^{-3}$ ). Es considera que la velocitat de difusió de l'aigua és 1,56 superior a la del  $\text{CO}_2$ , aquest valor varia si les condicions de l'entorn (com ara la temperatura, la pressió o les parets que ha de travessar) canvien de manera significativa. En els darrers anys s'ha avançat molt a l'hora de determinar els mecanismes que regulen la pèrdua d'aigua en resposta al  $\text{CO}_2$  atmosfèric, i això s'ha aprofitat per a la millora genètica i la selecció o la creació de material vegetal nou. En els propers anys, segurament la humanitat disposarà de material vegetal més eficient en la fotosíntesi i en l'ús de l'aigua.

### 2.3. Els estomes

Els estomes connecten el mesòfil de les plantes amb l'ambient exterior i tenen la capacitat d'obrir-se i tancar-se, cosa que permet controlar la transpiració i indirectament la fotosíntesi.

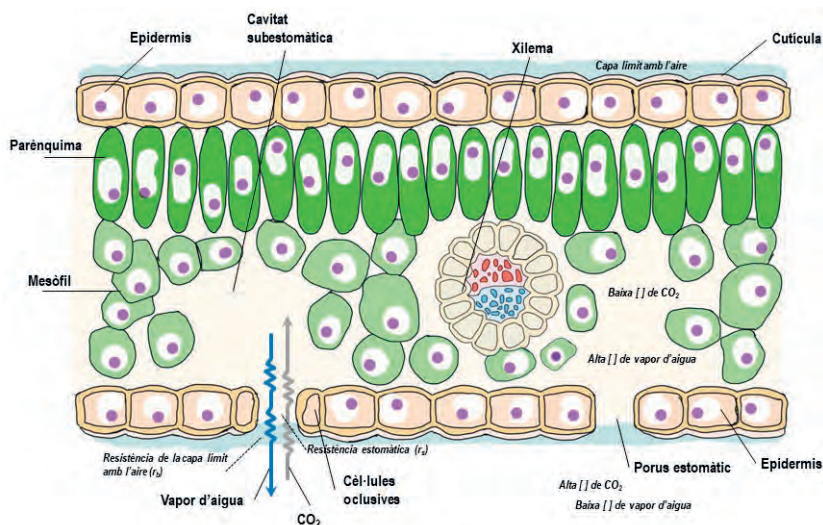
L'estructura bàsica d'un estoma està formada per dues cèl·lules oclusives (les que obren i tanquen el pas) a l'epidermis de la fulla i per una cavitat subestomàtica a l'interior, que connecta directament amb les cèl·lules del mesòfil. Les cèl·lules oclusives són sensibles a diferents factors (nivell d'estrès hídric de la planta, condicions ambientals, radiació, demanda de carbohidrats per part dels diferents òrgans de la planta, senyals hormonals i altres) i actuen per a buscar un equilibri entre les pèrdues d'aigua per transpiració i la producció de carbohidrats per la fotosíntesi. El procés d'evaporació es produeix dins de la fulla, en els espais intercel·lulars (concretament a la cavitat subestomàtica), i es difon a través dels estomes a l'atmosfera per la diferència de concentració de vapor d'aigua (figura 2).

Els cultius evaporen, a través dels estomes i de la cutícula, fins un 97% de l'aigua que absorbeixen. Quan els estomes estan tancats, s'assumeix, encara que no està provat al cent per cent, que la conductància mínima del vapor d'aigua correspon a la pèrdua d'aigua a través de la cutícula (permeabilitat) (Schuster, Burghardt i Riederer, 2017).

Algunes plantes presenten lenticel·les, petits orificis que permeten la pèrdua d'aigua. No obstant això, la transpiració lenticular només suposa entre un 1% i un 2% de les pèr-

FIGURA 2

Esquema de l'estructura i dels fluxos de vapor d'aigua i de diòxid de carboni en el tall transversal d'una fulla



FONT: Elaboració pròpia a partir de Taiz i Zeiger (2002).

dues d'aigua, excepte en determinats fruits, en els quals s'han estimat pèrdues del 21 %. Les lenticel·les es troben en l'escorça de troncs i rames d'algunes espècies, com l'actinídia i l'al·vocat, i en la pell d'alguns fruits, com les pomes o les peres, i de tubercles, com les patates. Les pomes, per exemple, en la fase de creixement poden perdre una petita part d'aigua a través de les lenticel·les de la pell (formada per l'epidermis i la cutícula) (Konarska, 2013).

En les condicions actuals, es pot afirmar que la transpiració estomàtica és la més important i que normalment supera el 90% del conjunt de la transpiració, tot i que la transpiració cuticular (inferior al 10%) i, en alguns casos, la transpiració lenticular (inferior a l'1%) no són menyspreables. Tanmateix, la transpiració cuticular, davant escenaris futurs de canvi climàtic (onades de calor i nits tropicals i tòrrides), pot agafar més importància, respecte de tota la planta i del fruit. A curt termini, això no obstant, no es preveuen canvis ambientals de prou intensitat per a afectar els patrons abans indicats.

Els estomes poden estar tan sols en una de les cares de les fulles, a la cara inferior són les denominades *fulles hipoestomàtiques*; d'altres (als cereals) presenten estomes a les dues cares (*fulles anfiestomàtiques*), o, en el cas de les plantes aquàtiques, en presenten tan sols a la part superior (*fulles epiestomàtiques*). La mida i quantitat d'estomes a les fulles són variables. La densitat d'estomes (nombre d'estomes per, normalment, mm<sup>2</sup>) és

**TAULA 1**

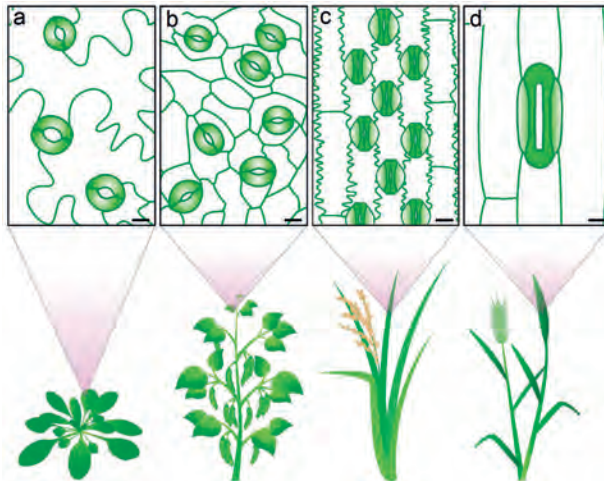
**Exemples de densitat estomàtica (nombre d'estomes / mm<sup>2</sup>) d'algunes espècies**

Nom comú	Espècie Nom científic	Densitat estomàtica a la superfície		Referència
		Adaxial (anvers)	Abaxial (revers)	
Blat	<i>Triticum aestivum</i> L.	45-92	34-81	Teare, Peterson i Law, 1971
Olivera	<i>Olea europaea</i> L.	—	312-470	Guerfel <i>et al.</i> , 2007
Olivera	<i>Olea europaea</i> L.	—	399-500	Hagidimitriou i Pontikis, 2005
Ordi	<i>Hordeum vulgare</i>	54-98	60-89	Jones, 2015
Pi	<i>Pinus sylvestris</i>	120	120	Jones, 2015
Pomera	<i>Malus domestica</i> Borkh cv. Fuji	—	340	Ro <i>et al.</i> , 2001
Pomera	<i>Malus pumila</i> (cv. Cox)	—	390	Jones, 2015
Presseguer	<i>Prunus persica</i> (L.) Batsch	—	352-420	Glenn, Scorza i Okie, 2006
Roure	<i>Quercus robur</i> L.	—	340	Jones, 2015
Soia	<i>Glycine max</i>	81-174	242-385	Jones, 2015
Tomaquera	<i>Lycopersicon sculentum</i>	2-28	83-105	Jones, 2015

FONT: Elaboració pròpia.

**FIGURA 3**

**Exemples de grandàries i densitats d'estomes a diverses plantes**



NOTA: a) *Arabidopsis thaliana*; b) *Phaseolus vulgaris*; c) *Oryza sativa*; d) *Triticum aestivum*. La barra de l'escala és de 10 µm.

FONT: Bertolino, Caine i Gray (2019).



un tret característic de cada espècie (taula 1) (figura 3). Per exemple, l'olivera presenta estomes només al revers de les fulles, amb una densitat al voltant de 400 estomes/mm<sup>2</sup>, els quals estan coberts per una densa capa de pèls en forma de para-sol, els tricomes (Rapoport i Moreno-Alfás, 2017).

Dels diferents mecanismes de regulació estomàtica que tenen les plantes, els més rellevants són els següents: la resposta a la irradiància solar, la resposta a la concentració de CO<sub>2</sub> intercel·lular i la resposta a les condicions de sequedat ambiental o del sòl.

L'efecte més conegut és la resposta estomàtica a la irradiància solar, i s'obtenen les màximes obertures amb irradiàncies de 200 Wm<sup>-2</sup> (Jones, 2015). La conductància estomàtica és sensible a la longitud d'ona de la llum en l'interval de la radiació fotosintèticament activa (PAR, de l'anglès *photosynthetically active radiation*) (que va de 400 nm a 700 nm); ho és, sobretot, en la banda del blau (sobre 450 nm) i, amb menys intensitat, en la del vermell (650 nm). Així, les plantes obren els estomes quan es donen les condicions de radiació que faran possible la fotosíntesi. No tindria sentit fer-ho quan no hi ha radiació (solar o artificial) suficient perquè es pugui produir la fotosíntesi, ja que perdrien aigua sense cap guany addicional.

L'obertura estomàtica és sensible al CO<sub>2</sub> de l'ambient i, específicament, a la fracció molar de CO<sub>2</sub> que hi ha als espais intercel·lulars de la fulla. El CO<sub>2</sub> intercel·lular actua com un avisador de la demanda de carbohidrats per part de la planta. Una concentració molt baixa de CO<sub>2</sub> indica que hi ha una activitat fotosintètica alta que consumeix més CO<sub>2</sub> de la cavitat subestomàtica que el que entra per l'estoma i, en conseqüència, l'estoma tendeix a obrir-se per a deixar pas al CO<sub>2</sub>. D'altra banda, una concentració molt elevada de CO<sub>2</sub> a la cavitat subestomàtica vol dir que hi ha poca o no hi ha cap activitat fotosintètica, per tant, no cal que hi entri CO<sub>2</sub> i l'estoma es tanca.

El dèficit de pressió de vapor ( $D_f$ ) entre la fulla (pressió de vapor de saturació a la temperatura de la fulla [ $T_f$ ], [ $e_s [T_f]$ ]) i l'atmosfera (pressió de vapor de l'aire [ $e_a$ ]) també afecta l'obertura estomàtica (2).

$$D_f = e_s(T_f) - e_a \quad (2)$$

Moltes espècies de plantes cultivades mostren disminucions de les conductàncies estomàtiques amb dèficits de pressió de vapor de l'ordre de 2 kPa, un valor al qual s'arriba fàcilment al migdia durant l'estiu a les zones temperades. Atès que la temperatura de la fulla afecta la pressió de vapor de la fulla, es pot afirmar que també afecta la conductància estomàtica.

Canvis en el potencial de turgència ( $\Psi_p$ ) de les cèl·lules oclusives provoquen el tancament o l'obertura dels estomes. Aquest potencial de turgència ( $\Psi_p$ ) depèn del potencial hídric d'una fulla ( $\Psi_f$ ) i del potencial osmòtic ( $\Psi_s$ ) (3). L'alteració de qualsevol compo-

ment de potencial afecta el potencial de turgència. Per tant, si es manté en equilibri el potencial osmòtic ( $\Psi_s$ ) (un equilibri dinàmic normal, en l'equilibri entre quantitat de solut i d'aigua), el tancament estomàtic és una conseqüència de la baixa disponibilitat d'aigua al sòl, que produeix una disminució del potencial hídric foliar. Moltes espècies comencen a tancar estomes a partir de potencials hídrics de  $-1$  MPa.

$$\Psi_f = \Psi_p + \Psi_s \quad (3)$$

L'hormona reguladora del creixement (ABA, àcid abscísic) també té un paper clau en el tancament estomàtic, tant si és de caràcter endogen com si és aplicada externament.

## 2.4. La refrigeració de la planta

Com s'ha comentat, una de les funcions de l'aigua a la planta és regular-ne la temperatura i evitar-ne un sobreescalfament genèric que podria malmetre'n moltes de les funcions vitals, i portar-la a la mort.

La calor latent de vaporització ( $\lambda$ ) és l'energia necessària per a vaporitzar un mol d'aigua (o un quilo d'aigua) i és una funció de la temperatura de l'aire ( $t$ ) (4).

$$\lambda = 2,501 - 2,361 \cdot 10^{-3} \cdot t \quad (4)$$

A  $20$  °C, la calor latent de vaporització és de  $2,45$  MJ kg<sup>-1</sup> o  $44$  kJ mol<sup>-1</sup>, mentre que la calor específica de l'aigua és de  $4,18$  kJ kg<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>. Per tant, a  $20$  °C, la calor latent és 586 vegades la calor específica (Campbell i Norman, 1998). Quan l'aigua s'evapora, pren l'energia de l'aire, fet que provoca una davallada de la seva temperatura. La fulla en contacte amb aquest aire també es refreda, cosa que proporciona millors condicions per a la fotosíntesi.

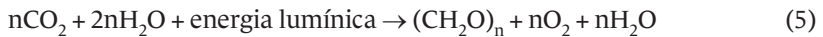
Aquest efecte refrigerant cal tenir-lo en compte en el cas de sistemes de protecció de gelades basats en l'ús de l'aigua, ja que l'evaporació directa de l'aigua que queda en la superfície de la planta després d'un reg abundant podria provocar gelades per evaporació.

Les plantes que no transpiren o transpiren molt poc perquè no tenen aigua disponible en el sòl presenten normalment una temperatura a les fulles entre  $2$  °C i  $4$  °C superiors a la temperatura de l'aire; en canvi, les plantes que transpiren (a l'estiu poden arribar a evaporar fins a  $8$  kg o  $9$  kg d'aigua per m<sup>2</sup> i dia), per aquest efecte refrescant que produeix la vaporització, presenten temperatures a les fulles alguns graus per sota de la temperatura de l'aire. La morfologia de les fulles i la grandària tenen un paper clau en la temperatura que assoleixen, que, a la vegada, depèn de condicions ambientals com la radiació neta, la humitat i la velocitat del vent. Aquest procés es va investigar als anys setanta, i al

principi dels anys vuitanta es va proposar un índex d'estrès hídric dels cultius per a gestionar millor l'aigua de reg (Jackson, 1982). Aquest índex, conegut com CWSI (de l'anglès, *crop water stress index*), es va experimentar als anys vuitanta i noranta, però no era fàcil fer-ne un ús pràctic, tot i que es van comercialitzar termòmetres d'infrarojos, com l'Scheduler®, que incorporaven un petit psicròmetre per a calcular el dèficit de pressió de vapor, mesuraven la temperatura de l'aire i la temperatura del cultiu i permetien fer mesures directes del CWSI. No obstant això, amb la introducció de les tècniques de la teledetecció, s'ha tornat a popularitzar en l'àmbit de la recerca aprofitant plataformes com els drons o les avionetes (Bellvert *et al.*, 2016; Berni *et al.*, 2009).

## 2.5. La fotosíntesi

La fotosíntesi és el procés pel qual les plantes, en concret, els cloroplasts de les cèl·lules verdes, transformen molècules de CO<sub>2</sub> i H<sub>2</sub>O en hidrats de carboni (CH<sub>2</sub>O), oxigen i vapor d'aigua, sempre en presència de llum, la qual proporciona l'energia necessària per a engegar aquesta reacció.



La fotosíntesi és altament dependent de les condicions idònies que faciliten el procés, que són bàsicament quatre: la disponibilitat d'irradiació (llum), la concentració de CO<sub>2</sub> atmosfèric de l'atmosfera i a la cavitat subestomàtica, la temperatura i l'estat hídric de la planta.

La dependència de la fotosíntesi a la llum és evident, tal com palesa l'equació (5). A la figura 4a, queda reflectit com la intensitat diària de fotosíntesi en pomera, en condicions no limitants d'altres factors, està estretament lligada a la intensitat de la radiació solar.

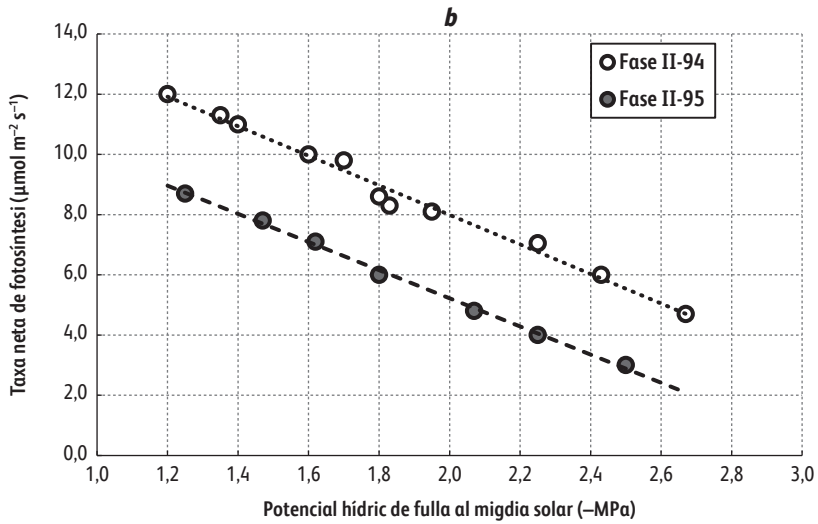
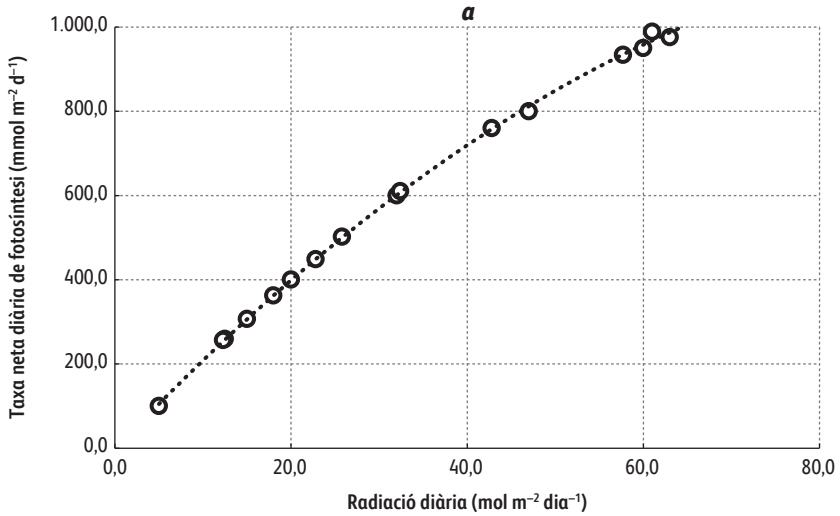
A més de la llum, hi ha altres factors que poden limitar la fotosíntesi: l'estat hídric de la planta (figura 4b) i la conductància estomàtica (figura 4d), que estan lligats a la disponibilitat d'aigua de les plantes, i també la temperatura de la fulla quan és superior a 28 °C (figura 4c), la qual depèn molt de la quantitat d'aigua que pot transpirar la fulla per a refrigerar-se.

## 2.6. Interdependència transpiració-fotosíntesi

El fet que tant la transpiració com l'entrada de CO<sub>2</sub> tinguin lloc a través de l'estoma fa pensar que hi ha interdependència entre aquests dos processos. De fet, és tan forta que,

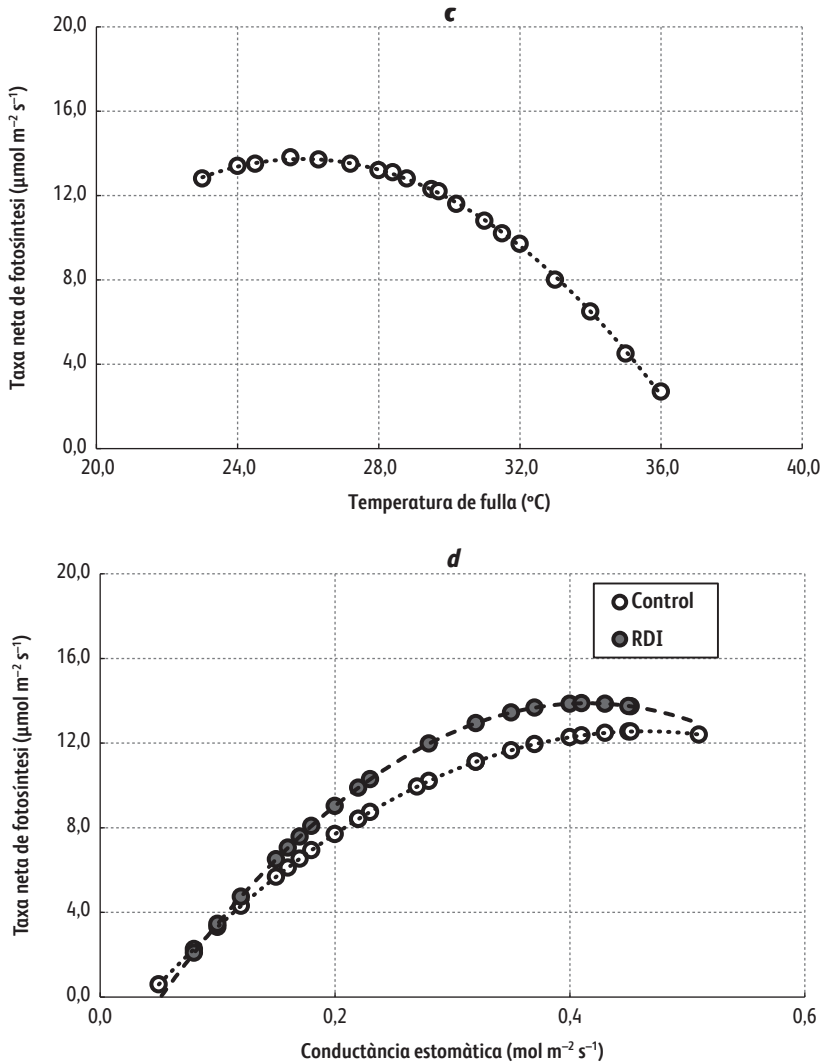
**FIGURA 4**

Relació entre la fotosíntesi i: a) la radiació diària en pomera; b) l'estat hídric de la planta, mesurat com a potencial hídric de la fulla, en presseguer; c) la temperatura de la fulla en presseguer, i d) la conductància estomàtica en presseguer



**FIGURA 4**

Relació entre la fotosíntesi i: a) la radiació diària en pomera; b) l'estat hídric de la planta, mesurat com a potencial hídric de la fulla, en presseguer; c) la temperatura de la fulla en presseguer, i d) la conductància estomàtica en presseguer (*Continuació*)

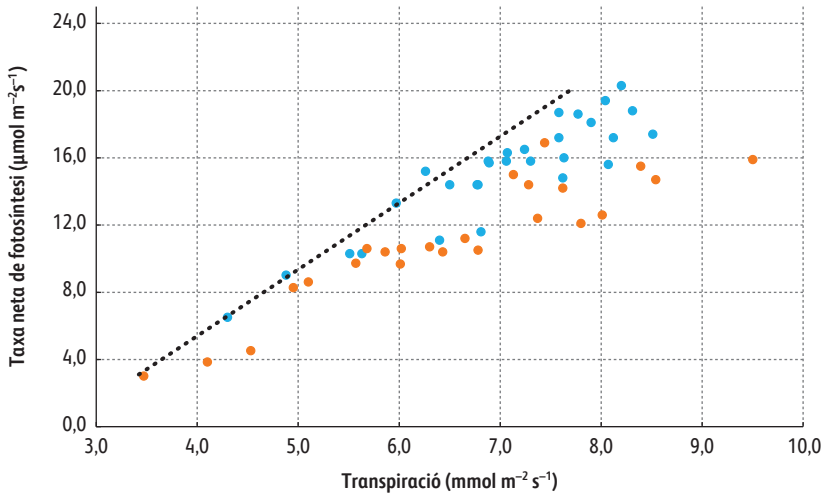


NOTA: FII-94: fase II dels fruits dels presseguers (d'enduriment del pinyol) de l'any 1994; FII-95: fase II de 1995. Control = reg sense limitacions; RDI = reg deficitari controlat.

FONT: Elaboració pròpia a partir de a) Auzmendi *et al.* (2013); b) Marsal i Girona (1997); c) i d) Girona *et al.* (1993).

FIGURA 5

Relació entre la fotosíntesi i la transpiració en fulles d'ametller



NOTA: La línia recta representa la relació òptima (sense factors limitants, que correspondria als punts blaus). Els punts taronges corresponen a un dia molt més de calorós i amb menys humitat relativa, que afecten el dèficit de pressió de vapor a l'atmosfera. Dades de 2016, obtingudes amb un equip Licor 6400 en ametllers de dos anys d'edat.

FONT: López i Girona.

si es planteja sense factors limitants (llum, estat hídric de la planta, estat nutricional...), la relació tendeix a ser lineal en una bona part del recorregut (figura 5). En condicions de molta sequedat ambiental (dies amb temperatures molt altes i humitats relatives molt baixes), la relació tendeix a desplaçar-se cap a la dreta (punts taronges de la figura 5).

Per a reduir les altes transpiracions es podrien utilitzar antitranspirants, naturals o sintètics, però no sempre tenen un efecte totalment positiu i cal valorar-ne l'ús.

## 2.7. El creixement de la planta i la seva dependència de l'aigua

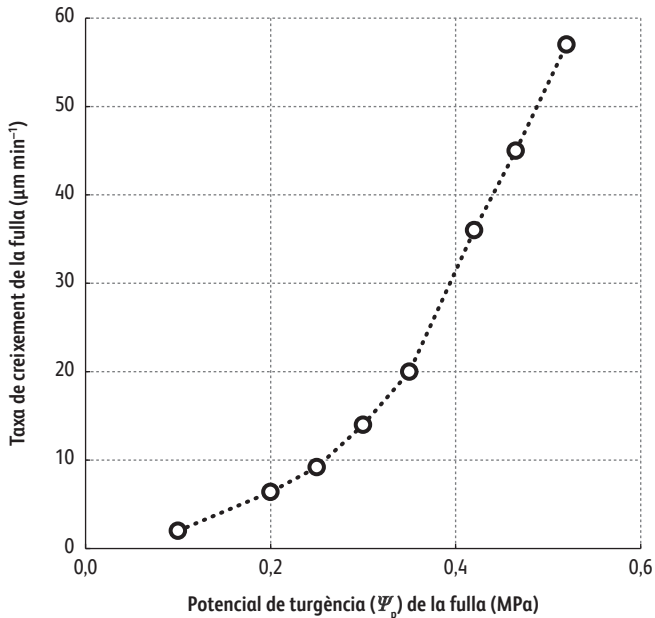
Tot i la diversitat d'espècies i de pautes de creixement, el creixement de les plantes es pot explicar amb tres fases ben diferenciades. La primera fase és de divisió cel·lular, en la qual les cèl·lules es divideixen en dues de més petites. En aquesta fase no augmenta significativament el volum de la planta o de l'òrgan on es produeix i pot no percebre's el creixement. La segona, d'engrossiment cel·lular, en la qual les cèl·lules es fan grans i es

percep un augment del volum de la planta o de l'òrgan. Si no hi hagués divisió cel·lular, el nombre de cèl·lules per a créixer seria molt limitat i el creixement total també. Finalment, la tercera, de diferenciació cel·lular, en què les cèl·lules s'especialitzen segons la funció que han de fer.

En la fase de divisió cel·lular, les cèl·lules han de tenir un volum mínim per a poder dividir-se i, després de la divisió, han de créixer de nou abans de tornar a dividir-se. L'augment de volum cel·lular d'aquesta fase, encara que mínim, és molt important perquè hi hagi un creixement visible. Un dels promotors més importants del creixement és el potencial de turgència ( $\Psi_p$ ), o sigui la pressió positiva que permet que les cèl·lules tendixin a augmentar en volum. Quan el  $\Psi_p$  és pròxim a zero (fet que es denomina *pèrdua de turgència*), les cèl·lules no creixen. De fet, el creixement és proporcional al  $\Psi_p$  (figura 6).

FIGURA 6

Relació entre el creixement vegetatiu d'una fulla de sorgo i el potencial de turgència



FONT: Elaboració pròpia a partir de Hsiao *et al.* (1976).

### 3. Exemples agronòmics de la importància de l'aigua en el comportament dels vegetals

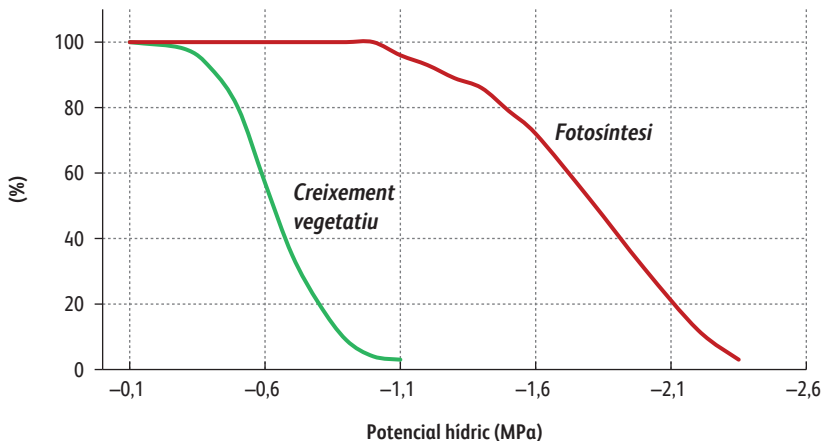
Tots els conceptes i processos explicats fins ara tenen utilitat pràctica en la gestió de l'aigua a l'agricultura. Per tal d'il·lustrar aquesta utilitat, tot seguit, es presenten alguns exemples de com l'ús d'aquesta informació és molt útil per a la gestió dels conreus, la gestió en general de l'aigua o la predicció de la capacitat productiva d'aliments a partir de les disponibilitats d'aigua.

#### 3.1. La sensibilitat estacional dels conreus al dèficit hídric

Les plantes, i en el cas que ens ocupa, els conreus, presenten sensibilitat genèrica al dèficit hídric, però sempre lligada a algun procés del seu funcionament. Els dos processos més rellevants són el creixement vegetatiu i la fotosíntesi, que assegura la sostenibilitat d'aquest creixement (estructura, reserves...); ambdós presenten una sensibilitat diferent al dèficit hídric. Mentre que el creixement vegetatiu es mostra molt sensible al dèficit hídric (amb petites baixades de potencial hi ha una caiguda important del creixement vegetatiu), la fotosíntesi s'hi mostra menys sensible (figura 7). Tot i que aquesta sensibi-

FIGURA 7

Dependència del creixement vegetatiu i de la fotosíntesi al potencial hídric ( $\Psi_h$ ) d'una fulla



FONT: Elaboració pròpia a partir de Hsiao (1981).

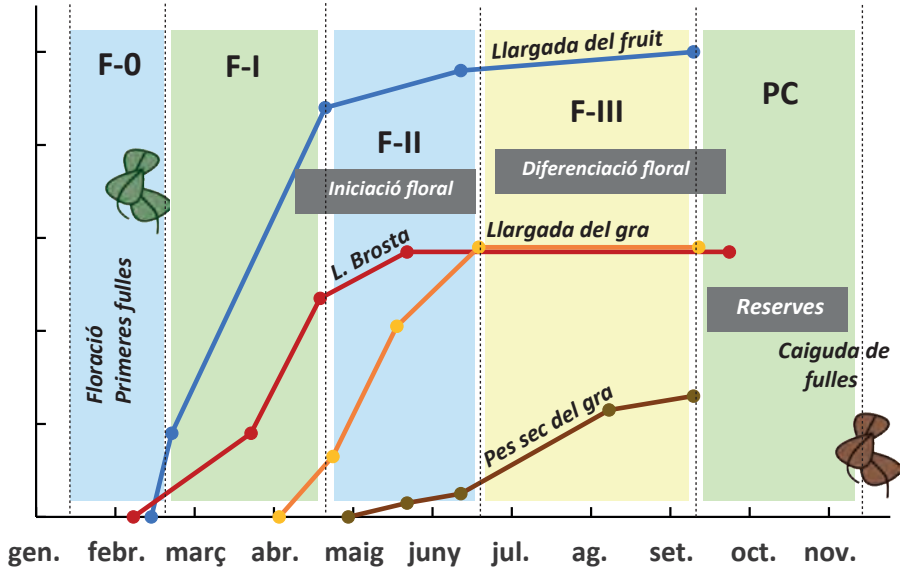


litat varia en funció de l'espècie i de les condicions de cultiu, es pot considerar que els valors presentats a la figura 7 caracteritzen, de manera genèrica, aquestes dependències.

Segons la importància que cada un d'aquests dos processos tingui en cada fase del cicle anual d'un conreu, es podrà definir la sensibilitat estacional d'aquest conreu al dèficit hídric. A tall d'exemple, en el cicle anual de l'ametller, amb les seves fases ben definides, si s'apliquen els criteris de la figura 7, es pot establir la sensibilitat al dèficit hídric de cada una de les fases. Així, les fases 0 i II són altament sensibles al dèficit hídric, les fases I i PC ho són, però no tant, i finalment la fase III és la menys sensible al dèficit (figura 8). Cal assenyalar que, tot i que en la fase I hi ha un creixement de rames i fruits important i un dèficit hídric sostingut seria netament negatiu, dèficits puntuals o de curta durada en les fases 0 i II poden afectar molt perquè afecten les flors i els borrons, òrgans més petits i més sensibles. D'acord amb aquest coneixement, es poden definir estratègies de reg, especialment per a aquells casos en què les dotacions són inferiors a la demanda total del conreu.

FIGURA 8

Sensibilitat estacional de l'ametller al dèficit hídric



NOTA: En blau: fases molt sensibles, en verd: fases sensibles i en groc: fase menys sensible.

FONT: Girona (2016).

### 3.2. Eficiència en l'ús de l'aigua (WUE)

L'eficiència en l'ús de l'aigua, entesa com aigua transpirada (T), es pot estudiar des de diferents vessants: eficiència fisiològica [ $\text{CO}_2$  fixat / T], eficiència productiva [ $\text{kg}/\text{T}$ ], eficiència econòmica [ $\text{€}/\text{T}$ ], eficiència energètica [energia utilitzada / T], eficiència ambiental [contaminants/T], eficiència social [llocs de treball / T]. Totes són rellevants; tanmateix, en aquest apartat s'analitzen l'eficiència fisiològica i l'eficiència productiva com a exemples més evidents. La forma més universal i àmpliament utilitzada per a representar aquest concepte és amb les sigles angleses WUE (*water use efficiency*).

L'eficiència en l'ús de l'aigua en l'àmbit fisiològic s'expressa com una eficiència instantània ( $\text{WUE}_i$ ) (6). La mesura instantània es pot fer amb equips<sup>1</sup> que mesuren de manera simultània les sortides de vapor d'aigua i les entrades de  $\text{CO}_2$  de la planta.

$$\text{WUE}_i = \frac{\text{Assimilació neta de } \text{CO}_2 \left( \mu\text{mol } \text{CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \right)}{\text{Transpiració} \left( \text{mol } \text{H}_2\text{O } \text{m}^{-2} \text{s}^{-1} \right)} \quad (6)$$

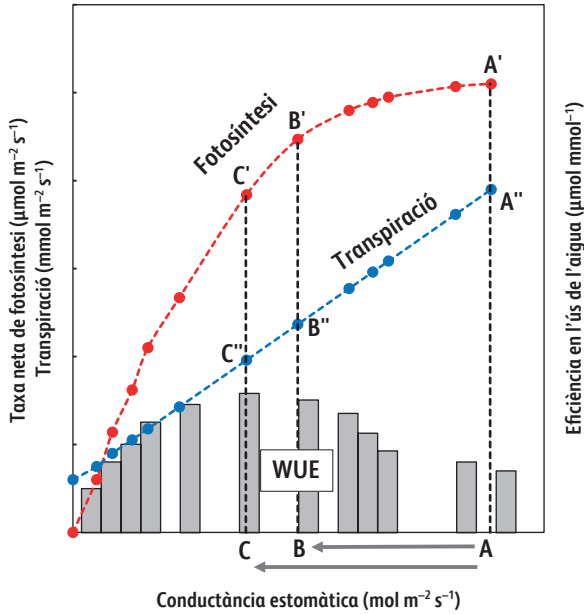
La relació entre la  $\text{WUE}_i$  i la conductància estomàtica està molt ben il·lustrada a la figura 9 (Yoo *et al.*, 2009). La relació entre el grau d'obertura dels estomes, expressat en forma de conductància estomàtica, i la transpiració és lineal: a mesura que els estomes es tanquen, disminueix de manera proporcional l'aigua que es perd per transpiració. En canvi, la davallada de la fixació de  $\text{CO}_2$  no és lineal, més aviat és una funció exponencial negativa: al començament disminueix menys que la transpiració, i per aquest motiu la  $\text{WUE}_i$  augmenta. Aquest avantatge és el que busquen molts fitogenetistes a l'hora de seleccionar o crear noves varietats, i també els agrònoms, per definir estratègies de reg deficitari o aplicar tècniques culturals destinades a minimitzar el dèficit hídric en els moments més sensibles. De fet, es pot definir el punt òptim de  $\text{WUE}_i$  (punt C de la figura 9), com el que minimitza la pèrdua d'aigua i maximitza la taxa d'assimilació de  $\text{CO}_2$ . El perill de no manejar adequadament aquest índex és que un fort tancament estomàtic manté la  $\text{WUE}_i$  elevada a costa de sacrificar l'assimilació de  $\text{CO}_2$ , cosa que ens portaria a un absurd des del punt de vista de productiu.

Des d'un punt de vista agronòmic, s'utilitza l'eficiència productiva o ràtio entre la matèria seca produïda per unitat d'aigua dissipada (per transpiració o per evapotranspiració). Hi ha variants, perquè la matèria seca pot fer referència a tota la biomassa generada a la part aèria d'un cultiu o fer referència només a la del producte, siguin pomes o gra

1. Vegeu: <<https://www.licor.com/env/products/photosynthesis>>.

FIGURA 9

Relacions entre la WUE<sub>i</sub> i la conductància estomàtica



FONT: Elaboració pròpia a partir de Yoo et al. (2009).

de blat de moro. Això sí, cal ser molt rigorosos a l'hora de definir aquests índexs perquè, en cas contrari, poden donar lloc a confusions. Una variant de l'eficiència productiva és la productivitat de l'aigua (WP, de l'anglès *water productivity*), que relaciona la producció del cultiu, normalment en termes de rendiment aprofitable ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), i la quantitat d'aigua utilitzada ( $\text{mm}$  o  $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ ). La WP es pot referir al volum d'aigua evapotranspirada pel cultiu durant tot el cicle ( $ET_a$ ) o a la suma d'aigua de reg i pluja efectiva ( $\text{Reg} + P_{ef}$ ), vegeu (7) i (8), respectivament, en què  $Y_a$  és la massa del rendiment comercial (Geerts i Raes, 2009). La WP també es pot expressar en termes monetaris ( $\text{€ m}^{-3}$  d'aigua de reg).

$$WP = \frac{Y_a}{ET_a} \quad (7)$$

$$WP = \frac{Y_a}{\text{Reg} + P_{ef}} \quad (8)$$

Aquests índexs són un bon indicador de les eficiències globals en l'ús de l'aigua i del seu rendiment productiu, i poden ajudar a prendre decisions en la gestió de l'aigua de reg quan hi ha restriccions, pel que fa a les comunitats de regants, per exemple. També davant de sòls problemàtics per baixa capacitat de retenció d'aigua o quan es vol gestionar el dèficit hídric per a millorar la qualitat del producte final (cas de la vinya i tants d'altres).

La WP, entesa com l'aigua utilitzada per la planta (quasi tota provinent de la transpiració i l'evaporació directa del sòl) per a una determinada producció, depèn bàsicament de la fisiologia de l'espècie, de la meteorologia i, especialment en cultius llenyosos, d'algunes tècniques de conreu (esporga, càrrega de fruits, sistema de reg...).

Una altra variant de la WP és l'eficiència de l'aigua de reg (iWP, de l'anglès *irrigation water productivity*) (9), en la qual l'*input* és el volum d'aigua de reg (Reg).

$$iWP = \frac{Y_a}{Reg} \quad (9)$$

Cal recordar que no tota l'aigua que s'aplica en el reg és aprofitable (en termes de transpiració) per la planta, i es pot derivar a d'altres llocs (percolació, escolament i evaporació directa del sòl) o emmagatzemar en zones allunyades de les arrels.

A la taula 2 es presenta un exemple de com s'aplica l'índex WP, en aquest cas la inversa de la WP (1/WP [litres / unitat de producte]), i de la seva utilitat per a analitzar escenaris diversos. D'acord amb l'Organització per a l'Alimentació i l'Agricultura (FAO),<sup>2</sup> per a produir una poma calen 70 L d'aigua. A partir de diversos treballs de l'Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries (IRTA) (Girona *et al.*, 2012) s'ha comprovat que, en condicions de reg per gravetat, s'han requerit 69 L, valor molt proper al de la FAO, però quan el reg és per degoteig i, a mesura que augmenten la informació, els coneixements i la tecnologia emprats en el reg, l'índex 1/WP disminueix fins a arribar a 27 L, que seria el topall actual.

Aquesta visió de la WP podria ser més teòrica que pràctica si no es fessin les observacions següents:

— No sempre coincideixen la màxima eficiència de l'aigua amb l'òptim productiu, cas presentat a la taula 2. Entre els valors màxim i mínim de litres necessaris (70 L i 27 L, respectivament) es poden trobar valors que milloren els resultats sense ser tan exigents. De fet, la taula 2 no presenta totes les dades experimentals, tan sols aquells casos que no comporten davallades productives significatives i que no posen en risc el conreu.

---

2. Vegeu: <<http://www.fao.org/resources/infographics/infographics-details/en/c/218940/>>.

TAULA 2

**Requeriments de l'aigua de reg per a obtenir una poma en funció del sistema de reg i del nivell d'informació-coneixement-tecnologia de què disposa el regant**

Sistema de reg / nivell d'informació	Producció (t/ha)	Aigua de reg (m <sup>3</sup> /ha)	Pluja efectiva (m <sup>3</sup> /ha)	1/WP (L/poma)
FAO				70
Reg per gravetat	39,0	8.700	2.100	69
Reg per degoteig (sense informació)	40,1	8.000	2.100	63
Reg per degoteig (i poca informació)	42,6	5.350	2.100	44
Reg per degoteig (i poca informació)	44,8	5.300	2.100	41
Reg per degoteig (i bona informació)	53,6	5.400	2.100	35
Reg per degoteig (i bona informació)	59,4	6.430	2.100	36
Reg per degoteig (i molta informació)	69,3	5.470	2.100	27

FONT: Girona *et al.* (2012).

— Quan es parla de màxima eficiència productiva, s'assumeix que les pèrdues per percolació són mínimes o nul·les, cosa que comporta un risc de salinització del sòl per manca de rentat. En el cas que ens ocupa, aquest fet s'ha tingut present, s'ha considerat una precipitació efectiva de 2.100 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> (210 mm), que, si la pluviometria mitjana de la zona (Urgell i Segrià) on s'ha fet l'estudi és de 371,6 mm, permet suposar que resten uns 160 mm, suficients per a un rentat del sòl, fins i tot, en els casos de més eficiència.

— L'índex 1/WP analitza dos factors: l'aigua utilitzada en el numerador i la producció en el denominador; en augmentar la producció millora l'indicador, tal com es mostra a la taula 2.

No es poden menystenir les pèrdues per evaporació directa de l'aigua del sòl, que poden ser importants quan acaba de ploure o s'acaba de regar. Una manera de reduir aquesta evaporació, i, per tant, de millorar la WP, és emprar sistemes de cobertura o encoixinament, una pràctica molt estesa amb efectes beneficiosos, com ara evitar la pujada a les capes més superficials de sals, on abunden les arrels, i de minerals, alguns dels quals, com el sodi, amb efecte tòxic (Lordan *et al.*, 2015) (figura 10).

### 3.3. La producció d'aliments i la disponibilitat d'aigua

Fa més de cent anys, Briggs i Shantz (1913) van investigar sobre les necessitats d'aigua de les plantes i van observar que hi havia una relació lineal entre la producció de matèria

FIGURA 10

Efecte de l'evaporació de l'aigua del sòl, amb cobertura i sense



NOTA: A l'esquerra: sòl amb cobertura (compost) per a evitar l'evaporació; a la dreta: sòl sense protecció, una mostra de l'acumulació de sals per l'evaporació de l'aigua i una planta amb aspecte mustí.

FONT: Fotografies dels autors.

seca i la transpiració. La resposta dels cultius a l'aigua de reg s'ha descrit amb les anomenades *funcions cultiu-aigua-rendiment* (CWYF, de l'anglès *crop-water-yield function*). Més tard, Wit (1958) descriu la producció de matèria seca ( $Y$ ) com una funció de l'aigua transpirada ( $T$ ), un coeficient de cultiu ( $m$ ) i l'evaporació mitjana d'una làmina d'aigua lliure ( $E_0$ ), que és una manera d'introduir l'efecte del dèficit de pressió de vapor de l'atmosfera (10):

$$Y = \frac{mT}{E_0} \quad (10)$$

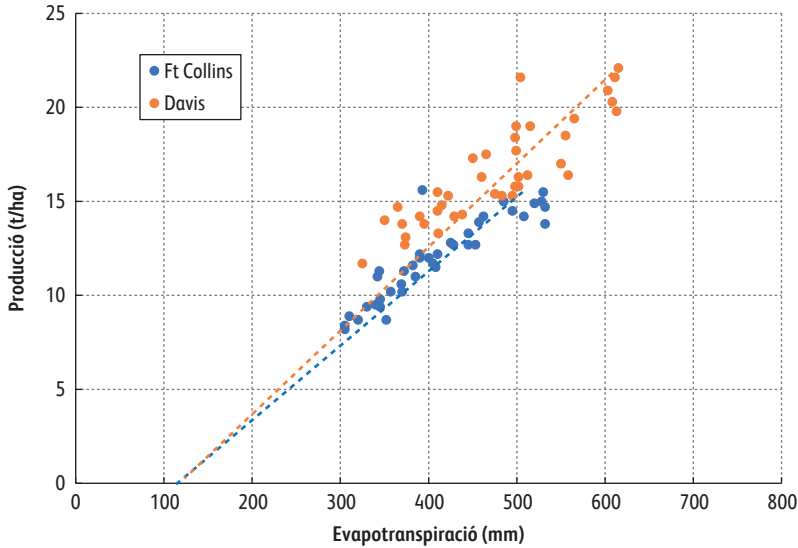
A la figura 11, es posa en relleu l'alta relació entre l'aigua utilitzada per la planta i la seva capacitat de producció. Les conclusions immediates que es poden treure d'aquesta relació és que per a produir aliments es necessita aigua, que evidentment sense aigua no hi ha producció i que aquesta producció és sempre proporcional a l'aigua evapotranspirada pel conreu. Per a la majoria de conreus es disposa de funcions de producció, moltes de les quals es poden trobar a la publicació FAO-66 (Steduto *et al.*, 2012).

Aquestes funcions representen el màxim productiu en unes condicions determinades. Però la realitat és molt diversa, i, per a atendre aquesta variabilitat, Stewart *et al.* (1977) van proposar un model en el qual el rendiment relatiu disminueix, de manera lineal, en funció de l'evapotranspiració relativa, segons l'equació següent (11):

$$1 - \frac{Y}{Y_{MAX}} = ky \left[ 1 - \frac{ET_r}{ET_{MAX}} \right] \quad (11)$$

FIGURA 11

Dues funcions de producció del blat de moro obtingudes experimentalment en dues localitzacions dels Estats Units d'Amèrica. Any 1975



FONT: Elaboració pròpia a partir de Hanks (1983).

en què  $Y$  és el rendiment que s'obté amb una evapotranspiració real ( $ET_r$ ),  $Y_{MAX}$  és el rendiment màxim que s'obté amb una evapotranspiració  $ET_{MAX}$  i  $k_y$  és un coeficient de resposta que varia segons el cultiu, la varietat, el sistema de reg i l'estadi de desenvolupament. Aquest model va ser adaptat per la FAO l'any 1978 (Doorenbos i Kassam, 1979) i més recentment a la publicació coneguda com a *FAO-66*, l'any 2012 (Steduto *et al.*, 2012). A tall d'exemple, suposem que en un cultiu de blat de moro es dona una reducció de l'ET del 25 % durant tot el cicle de cultiu, si el coeficient  $k_y$  és d'1,25, la reducció relativa del rendiment serà del 31 %. D'aquesta manera, es pot estimar l'efecte d'una baixa disponibilitat d'aigua en el cicle productiu, cosa que pot ajudar a decidir com assignar el recurs de l'aigua de reg a les comunitats de regants.

Aquests models s'adapten bé a l'ET, però, pel que fa a l'aigua aplicada, la relació pot deixar de ser lineal si no es fa una gestió adequada del reg i es minimitzen les pèrdues per drenatge, percolació profunda, escolament, etc.

## 4. Conclusions

La importància de l'aigua en el sistema de producció d'aliments és molt rellevant, fins al punt que, tal com s'indica en aquest capítol, sense aigua no hi ha aliments. Això implica que la gestió del reg ha de ser molt acurada, i cal entendre els processos fisiològics de la planta per tal que es trobi en l'estat hídric apropiat a cada estadi del seu cicle anual. Conèixer i utilitzar els conceptes fisiològics (potencial hídric de la planta, temperatura de la capçada, transpiració...) per a la gestió del reg és, i serà en el futur proper, un requisit per a una bona gestió del recurs de l'aigua, especialment amb la introducció d'altres tecnologies lligades a la teledetecció o al món de l'Internet i els satèl·lits.

## Bibliografia

- AUZMENDI, I.; MARSAL, J.; GIRONA, J.; LOPEZ, G. (2013). «Daily photosynthetic radiation use efficiency for apple and pear leaves: Seasonal changes and estimation of canopy net carbon exchange rate». *European Journal of Agronomy* [en línia], vol. 51, p. 1-8. <<https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.05.007>> [Consulta: febrer 2021].
- BAILEY-SERRES, J.; PARKER, J. E.; AINSWORTH, E. A.; OLDROYD, G. E. D.; SCHROEDER, J. I. (2019). «Genetic strategies for improving crop yields». *Nature* [en línia], vol. 575, p. 109-118. <<https://doi.org/10.1038/s41586-019-1679-0>> [Consulta: febrer 2021].
- BELLVERT, J.; MARSAL, J.; GIRONA, J.; GONZALEZ-DUGO, V.; FERERES, E.; USTIN, S. L.; ZARCO-TEJADA, P. J. (2016). «Airborne thermal imagery to detect the seasonal evolution of crop water status in peach, nectarine and saturn peach orchards». *Remote Sensing*, vol. 8, p. 39.
- BERNI, J. A. J.; ZARCO-TEJADA, P. J.; SEPULCRE-CANTÓ, G.; FERERES, E.; VILLALOBOS, F. (2009). «Mapping canopy conductance and CWSI in olive orchards using high resolution thermal remote sensing imagery». *Remote Sensing of Environment* [en línia], vol. 113. <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.06.018>> [Consulta: febrer 2021].
- BERTOLINO, L. T.; CAINE, R. S.; GRAY, J. E. (2019). «Impact of stomatal density and morphology on water-use efficiency in a changing world». *Frontiers in Plant Science*, vol. 10, p. 225. DOI: 10.3389/fpls.2019.00225.
- BRIGGS, L. J.; SHANTZ, H. L. (1913). «The water requirement of plants. I. Investigations in the Great Plains in 1910 and 1911». *U. S. Bur. Plant Indus. Bul.*, núm. 284, p. 49.
- CAMPBELL, G. S.; NORMAN, J. M. (1998). *An introduction to environmental biophysics*. 2a ed. Nova York: Springer. 286 p.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. (1979). «Yield response to water». *FAO Irrigation and Drainage Paper* [Roma: Food and Agriculture Organization], núm. 33.



- DUNN, J.; HUNT, L.; AFSHARINAFAR, M.; MESELMANI, M. A.; MITCHELL, A.; HOWELLS, R.; WALLINGTON, E.; FLEMING, A. J.; GRAY, J. E. (2019). «Reduced stomatal density in bread wheat leads to increased water-use efficiency». *Journal of Experimental Botany*, vol. 70 (18), p. 4737-4748.
- GEERTS, S.; RAES, D. (2009). «Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas». *Agricultural Water Management*, vol. 96, p. 1275-1284.
- GIRONA, J. (2016). «Estrategias de riego en almendro bajo diferentes escenarios de disponibilidades de agua en el Valle del Ebro». *Revista de Fruticultura*, número especial, p. 118-127.
- GIRONA, J.; CASADESÚS, J.; MATA, M.; CAMPO, J. del; ARBONÉS, A.; LÓPEZ, G.; RUFAT, J.; MARSAL, J. (2012). «Eficiencia productiva del agua en función de la tecnología y el conocimiento aplicados al manejo del riego en diferentes cultivos». Comunicació presentada al Congrés Agricultura, Agua y Energía: Ciencia, Tecnología, Política y Planificación del Agua y de la Energía en los Regadíos. Aspectos Socioeconómicos y Ambientales (Madrid, 11 i 12 de maig de 2011).
- GIRONA, J.; MATA, M.; GOLDHAMER, D. A.; JOHNSON, R. S.; DEJONG, T. M. (1993). «Patterns of soil and tree water status and leaf functioning during regulated deficit irrigation scheduling in peach». *Journal of the American Society for Horticultural Science*, vol. 118 (5), p. 580-586.
- GLENN, D. M.; SCORZA, R.; OKIE, W. R. (2006). «Genetic and environmental effects on water use efficiency in peach». *Journal of the American Society for Horticultural Science*, vol. 131 (2), p. 290-294.
- GUERFEL, M.; BOUJNAH, D.; BACCOURI, B.; ZARROUK, M. (2007). «Evaluation of morphological and physiological traits for drought tolerance in 12 tunisian olive varieties (*Olea europaea* L.)». *Journal of Agronomy*, vol. 6, p. 356-361.
- HAGIDIMITRIOU, M.; PONTIKIS, C. A. (2005). «Seasonal changes in CO<sub>2</sub> assimilation in leaves of five major Greek olive cultivars». *Scientia Horticulturae*, vol. 104, p. 11-24.
- HANKS, R. G. (1983). «Yield and water-use relationships: An overview». A: TAYLOR, H. M.; JORDAN, W. R.; SINCLAIR, T. R. (ed.). *Limitations to efficient water use in crop production*. Madison, Wisconsin: American Society of Agronomy, Inc.: Crop Science Society of America, Inc.: Soil Science Society of America, Inc., p. 393-411.
- HSIAO, T. C. (1981). «Photosynthesis». A: MICKE, W. C. (ed.). *U. C. Almond production manual* (1996). Oakland, California: University of California. Division of Agriculture and Natural Resources. 294 p. [Publicació 3364]
- HSIAO, T. C.; ACEVEDO, E.; FERERES, E.; HENDERSON, D. W. (1976). «Water stress, growth and osmotic adjustment». *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B*, vol. 273, p. 479-500.

- JACKSON, R. D. (1982). «Canopy temperature and crop water stress» A: HILLEL, D. (ed.). *Advances in irrigation* [en línia]. Vol. 1. Estats Units: Elsevier. <<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-024301-3.50009-5>> [Consulta: febrer 2021].
- JONES, H. (2015). *Plants and microclimate: A quantitative approach to environmental plant physiology*. 3a ed. Cambridge: Cambridge University Press. DOI: 10.1017/CBO9780511845727.
- KONARSKA, A. (2013). «The structure of the fruit peel in two varieties of *Malus domestica* Borkh (*Rosaceae*) before and after storage». *Protoplasma*, vol. 250, p. 701-714.
- LIAO, J. X.; CHANG, J.; WANG, G. X. (2005). «Stomatal density and gas exchange in six wheat cultivars». *Cereal Research Communications*, vol. 33 (4), p. 719-726.
- LORDAN, J.; PASCUAL, M.; VILLAR, J. M.; FONSECA, F.; PAPIÓ, J.; MONTILLA, V.; RUFAT, J. (2015). «Use of organic mulch amendments to enhance peach crop production and water use efficiency under limiting soil conditions». *Spanish Journal of Agricultural Research* [en línia], vol. 13 (4), p. e0904. <<http://dx.doi.org/10.5424/sjar/2015134-6694>> [Consulta: febrer 2021].
- MARSAL, J.; GIRONA, J. (1997). «Relationship between leaf water potential and gas exchange activity at different phenological stages and fruit loads in peach trees». *Journal of the American Society for Horticultural Science*, vol. 122 (3), p. 415-421.
- RAPOPORT, H. F.; MORENO-ALÍAS, I. (2017). «Botánica y morfología». A: *El cultivo del olivo*. 7a ed. Madrid: Mundi-Prensa.
- RO, H. M.; KIM, P. G.; LEE, I. B.; YIEM, M. S.; WOO, S. Y. (2001). «Photosynthetic characteristics and growth responses of dwarf apple (*Malus domestica* Borkh cv. Fuji) saplings after 3 years of exposure to elevated atmospheric carbon dioxide concentration and temperature». *Trees*, vol. 15 (4), p. 195-203.
- SCHUSTER, A. C.; BURGHARDT, M.; RIEDERER, M. (2017). «The ecophysiology of leaf cuticular transpiration: Are cuticular water permeabilities adapted to ecological conditions?». *Journal of Experimental Botany* [en línia], vol. 68 (19), p. 5271-5279. <<https://doi.org/10.1093/jxb/erx321>> [Consulta: febrer 2021].
- STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E.; RAES, D. (2012). *Crop yield response to water* [en línia]. Roma: FAO. (FAO Irrigation and Drainage Paper; 66). <<http://www.fao.org/docrep/016/i2800e/i2800e00.htm>> [Consulta: febrer 2021].
- STEWART, J. I.; CUENCA, R. H.; PRUITT, W. O.; HAGAN, R. M.; TOSSO, J. (1977). *Determination and utilization of water production functions for principal California crops*. Davis, California: W-67 Calif. Contrib. Proj. Rep. University of California.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. (2002). *Plant physiology*. 3a ed. Sunderland: Sinauer Associates.
- TEARE, I. D.; PETERSON, C. J.; LAW, A. G. (1971). «Size and frequency of leaf stomata in cultivars of *Triticum aestivum* and other triticum species 1». *Crop Science*, vol. 11 (4), p. 496-498.

- WIT, C. T. de (1958). «Transpiration and crop yields». *Agricultural Research Reports* [Pudoc, Wageningen], vol. 64, p. 6.
- YOO, C. Y.; PENCE, H. E.; HASEGAWA, P. M.; MICKELBART, M. V. (2009). «Regulation of transpiration to improve crop water use». *Critical Reviews in Plant Science*, vol. 28 (6), p. 410-431. DOI: 10.1080/07352680903173175.