

Acqua e suolo: relazioni, criticità e prospettive per l'agricoltura

Giuliano Mosca¹, Marcello Pagliai¹ e Paolo Tarolli²

¹ Accademia dei Georgofili

² Dipartimento TESAF - Università di Padova

Questo contributo non intende affrontare in modo esaustivo il complesso tema dei rapporti tra acqua e suolo, ma si propone di coglierne gli elementi essenziali e le principali interconnessioni. Nella prima parte vengono richiamate alcune acquisizioni fondamentali relative alla risorsa idrica, mentre nella seconda sono analizzate le relazioni tra il suolo e il fattore acqua in funzione di un'agricoltura orientata alla sostenibilità. Il testo è inoltre arricchito da brevi riferimenti alle più recenti acquisizioni in ambito biotecnologico, in particolare alle Tecniche di Evoluzione Assistita (TEA) e al genome editing (CRISPR/Cas9). Infine, si è ritenuto opportuno richiamare alcuni esempi di conflitti, storici e attuali, legati al controllo e all'utilizzo della risorsa idrica.

In occasione del vertice Rio+20 sullo sviluppo sostenibile, svoltosi a Rio de Janeiro nel giugno 2012 a vent'anni dalla Conferenza delle Nazioni Unite su Ambiente e Sviluppo del 1992, Ban Ki-moon, allora Segretario Generale delle Nazioni Unite, sottolineò il carattere strategico di quella che definì un'opportunità "unica" per affrontare le grandi sfide dello sviluppo sostenibile. Nel suo intervento affermò: *"Le sicurezze idrica, energetica, alimentare sono le più grandi sfide che l'umanità dovrà fronteggiare nei prossimi decenni per una popolazione mondiale in crescita e per una migliore qualità della vita delle popolazioni più povere che rappresentano la maggioranza dell'umanità del pianeta (85%): sfide che dovranno fare i conti, non solo con i cambiamenti del clima, che rimane il fattore di maggior rischio, ma anche con la forte espansione di domanda d'acqua, di energia e di proteine alimentari, oltre che degli inquinamenti e dell'uso, attualmente insostenibile, delle risorse naturali."*

Il ciclo e la distribuzione dell'acqua

A scala globale, circa il 71% della superficie terrestre è coperto da acqua, della quale il 97,5% è salata. Del restante 2,5% di acqua dolce, solo una quota molto limitata è direttamente disponibile per gli usi umani, poiché la maggior parte è immagazzinata sotto forma di ghiacci e nevi perenni. In termini funzionali, meno dell'1% dell'acqua dolce risulta effettivamente accessibile, e di questa quota la percentuale largamente prevalente è destinata all'agricoltura, che a livello mondiale assorbe circa il 70% dei prelievi complessivi. In Italia, tale valore risulta inferiore, attestandosi su percentuali prossime ma inferiori al 60%.

Negli ultimi decenni la disponibilità media annua di risorsa idrica mostra una tendenza alla riduzione, determinata sia dagli effetti dei cambiamenti climatici sia dalle rilevanti perdite lungo le reti di distribuzione. Nonostante l'Italia rientri ancora tra i Paesi europei con una relativamente elevata dotazione idrica, il territorio nazionale è caratterizzato da livelli significativi di stress idrico, soprattutto per effetto della marcata irregolarità spaziale e temporale delle precipitazioni. A scala

globale, ampie porzioni della fascia subtropicale risultano oggi sottoposte a condizioni di stress idrico strutturale, con tassi medi annui di prelievo ormai prossimi ai livelli di disponibilità naturale. Le stime indicano che entro il 2050 la domanda mondiale di acqua potrebbe quasi raddoppiare.

In questo contesto, l'insufficienza delle acque superficiali ha determinato un crescente ricorso alle risorse sotterranee. Anche l'Italia rientra tra i primi Paesi al mondo per incremento del prelievo di acque di falda. Secondo quanto riportato dal *World Water Development Report* dell'UNESCO, negli ultimi cinquant'anni la quantità globale di acqua sotterranea estratta è triplicata e continua ad aumentare a un ritmo compreso tra l'1 e il 2% annuo. Le proiezioni climatiche indicano inoltre che, nel Sud Europa, le portate fluviali estive potrebbero ridursi entro la fine del secolo di percentuali comprese tra il 60% e l'80%, mentre il potenziale idroelettrico potrebbe diminuire dal 20 al 50%.

Alla luce di queste evidenze, il presente contributo propone una ricognizione sull'utilizzo del bene acqua nell'Antropocene, evidenziando come, accanto alla sua centralità per gli ecosistemi e per le attività produttive, emergano limiti strutturali e modalità di impiego non sempre coerenti con criteri di sostenibilità a lungo termine.

Il tema viene quindi affrontato a partire da una sorta di *cahier de doléances*, che richiama in modo diretto le profonde disuguaglianze e le criticità legate all'accesso alla risorsa idrica. È noto che, mentre senza cibo l'organismo umano può sopravvivere per alcune settimane, in assenza di acqua la sopravvivenza difficilmente supera pochi giorni. Il fabbisogno minimo biologico pro-capite per la sopravvivenza è stimato in circa 5 litri di acqua nelle 24 ore, mentre per garantire condizioni di vita dignitose sono necessari non meno di 50 litri al giorno per persona. Le Nazioni Unite hanno individuato nel valore di 40 litri pro-capite al giorno una soglia minima per il diritto all'acqua; tuttavia, a scala globale, la disponibilità e i consumi risultano estremamente disomogenei.

I dati evidenziano forti disparità tra Paesi e aree geografiche: il consumo medio giornaliero pro-capite raggiunge circa 425 litri negli Stati Uniti, si attesta su 237 litri in Italia e su 150 litri in Francia, mentre scende a livelli estremamente ridotti in diversi Paesi africani, come il Madagascar, dove la disponibilità media è dell'ordine di 10 litri pro-capite al giorno. Stime più generali indicano un consumo medio di circa 350 litri al giorno per una famiglia canadese, di 165 litri per una famiglia europea e di 20 litri per una famiglia africana. Secondo l'Organizzazione Mondiale della Sanità, circa il 40% della popolazione mondiale vive in condizioni igienico-sanitarie precarie, in larga misura a causa della carenza di acqua. Un abitante su due risiede in abitazioni prive di sistemi fognari adeguati e una persona su cinque non dispone di un accesso sufficiente ad acqua potabile; in almeno 29 Paesi, oltre il 65% della popolazione si colloca al di sotto del fabbisogno idrico vitale e più di un miliardo di individui consuma acqua considerata non sicura.

Le conseguenze sanitarie di tali carenze sono particolarmente gravi: ogni anno milioni di persone muoiono a causa di malattie trasmesse dall'acqua, con una stima di circa cinquemila bambini al giorno. L'emergenza idrica, tuttavia, non riguarda esclusivamente i Paesi in via di sviluppo, ma interessa anche l'Europa. Secondo l'OMS, circa il 16% della popolazione europea non dispone di acqua potabile e una quota rilevante non ha accesso a servizi igienico-sanitari adeguati; oltre 13.000 bambini europei muoiono ogni anno per patologie correlate a queste carenze, dato che la stessa Organizzazione ritiene probabilmente sottostimato. Nell'Europa orientale l'impatto risulta particolarmente elevato in diversi Paesi della cosiddetta "sub-regione B", dove persistono gravi criticità infrastrutturali e sanitarie. In questo quadro, il consumo umano di acqua continua a essere associato, ancora oggi, a rilevanti rischi di infezione, confermando come la questione idrica rappresenti una sfida sanitaria, sociale e ambientale di primaria importanza.

I maggiori rischi d'infezione

Numerose patologie sono veicolate dall'acqua o strettamente associate alla sua gestione e qualità. Tra le principali si annoverano la malaria, la schistosomiasi, la filariosi, l'oncocercosi, la tripanosomiasi africana, la dengue e la febbre gialla. La trasmissione di tali malattie avviene attraverso diversi vettori biologici, tra cui varie specie di zanzare, la mosca tse-tse, la mosca nera e alcune specie di molluschi d'acqua dolce. In un contesto di progressivo riscaldamento globale, la probabilità di una modificazione nella distribuzione geografica e stagionale di queste patologie risulta in aumento; in particolare, malaria e schistosomiasi, insieme alla dengue¹, figurano tra le malattie maggiormente sensibili alle variazioni climatiche e ai cambiamenti nei regimi idrologici.

¹ Di origine virale, la dengue è causata da quattro virus molto simili ed è trasmessa all'uomo dalle punture di zanzare che abbiano, a loro volta, punto una persona infetta. Non si ha quindi contagio diretto tra esseri umani, anche se l'uomo è il principale ospite del virus. Il virus circola nel sangue della persona infetta per 2-7 giorni, e in questo periodo la zanzara può prelevare e trasmetterlo ad altri. Nell'emisfero occidentale il vettore principale è la zanzara *Aedes aegypti*, anche se si sono registrati casi trasmessi anche da *Aedes albopictus*.

Bere acqua potabile

Da una ricognizione sintetica sul tema dell'accesso all'acqua potabile emergono criticità di rilevanza globale. Attualmente, circa una persona su otto, pari a circa 900 milioni di individui, non dispone di acqua pulita. Le conseguenze sanitarie sono rilevanti: si stima che i decessi dovuti a malattie trasmesse dall'acqua siano dell'ordine di 4.800 al giorno, causati da patologie quali colera, leptospirosi, botulismo e altre infezioni correlate alla qualità dell'acqua.

La conservazione dell'acqua destinata al consumo umano rappresenta un ulteriore elemento critico, poiché, se prolungata o effettuata in condizioni non adeguate, può favorire la contaminazione da agenti patogeni, sostanze tossiche e, in casi

particolari, anche da contaminanti radioattivi. Tra i metodi più efficaci per mantenere l'acqua potabile rientrano la bollitura, la conservazione in contenitori idonei in plastica o vetro, l'esposizione solare e la clorazione.

Un contributo crescente all'approvvigionamento idrico è fornito dai processi di dissalazione. L'acqua dolce prodotta dagli impianti attualmente in funzione ammonta a circa 60 miliardi di litri, consentendo a circa 300 milioni di persone di dipendere, almeno in parte, dall'acqua marina desalinizzata. Le quantità prodotte variano sensibilmente in funzione delle tecnologie adottate, delle dimensioni degli impianti e delle specifiche esigenze locali: gli impianti industriali possono raggiungere capacità di diversi milioni di metri cubi al giorno, mentre quelli di minori dimensioni producono alcune centinaia di metri cubi all'ora. In termini generali, la produzione può attestarsi su valori dell'ordine di 100.000 m³/h di acqua potabile o di qualità comparabile.

Alcuni interrogativi consentono di inquadrare ulteriormente la complessità del tema. Per ogni litro di acqua imbottigliata sono necessari, in media, circa 5,3 litri di acqua, oltre alla quantità effettivamente confezionata. Circa 3,6 miliardi di persone, pari al 46% della popolazione mondiale, non dispongono di impianti adeguati per l'accesso all'acqua potabile e utilizzano servizi igienici che non garantiscono il trattamento dei rifiuti umani. Nei Paesi in via di sviluppo, la distanza media percorsa quotidianamente per l'approvvigionamento idrico è stimata in circa 6 km al giorno. Infine, tra i Paesi con il più elevato consumo di acqua in bottiglia si colloca l'Italia, con un valore di circa 200 litri pro-capite all'anno, dato che evidenzia criticità non solo ambientali ma anche culturali e gestionali nell'uso della risorsa idrica.

L'impronta ambientale dell'acqua nell'Antropocene

Le espressioni **acqua blu**, **acqua verde** e **acqua grigia** indicano concetti distinti, ampiamente utilizzati in ambito ambientale e nella gestione delle risorse idriche. Tale distinzione risulta essenziale per comprendere in che modo l'acqua venga utilizzata, consumata o impattata all'interno di un sistema produttivo o domestico.

L'**acqua blu** è costituita dall'acqua dolce prelevata da corpi idrici superficiali o sotterranei, quali fiumi, laghi e falde acquifere. Essa comprende l'acqua utilizzata per l'irrigazione agricola, per i processi industriali e per gli usi civili. Si tratta della forma di acqua dolce più "visibile" e direttamente consumata, in quanto sottratta ai sistemi idrici naturali.

L'**acqua verde** corrisponde all'acqua piovana che viene assorbita dal suolo e utilizzata dalle piante attraverso i processi fisiologici di crescita ed evapotraspirazione. È una componente fondamentale dell'agricoltura non irrigua e rappresenta una parte integrante del ciclo naturale dell'acqua, poiché non implica un prelievo diretto da fiumi o falde.

L'**acqua grigia** indica invece il volume di acqua necessario a diluire o trattare gli inquinanti generati da un determinato processo produttivo fino a riportarne le concentrazioni entro limiti ambientali accettabili. Non si tratta di una tipologia di acqua fisicamente utilizzata, come nel caso dell'acqua blu o verde, ma di un indicatore di impatto ambientale che esprime la pressione esercitata sulle risorse idriche a causa dell'inquinamento.

Il concetto di **impronta idrica** integra le componenti di acqua blu, verde e grigia al fine di quantificare in modo completo quanta acqua venga complessivamente consumata e inquinata da un prodotto, da un'azienda o da un individuo. Ciascuna componente rappresenta una diversa forma di pressione sul sistema idrico; considerate congiuntamente, esse forniscono un quadro molto più realistico rispetto alla sola valutazione del consumo diretto. Nel calcolo dell'impronta idrica, l'**acqua blu** misura la quantità di acqua dolce prelevata da fiumi, laghi o falde che viene effettivamente consumata e non restituita all'ambiente. Ne sono esempi l'irrigazione agricola, l'acqua industriale che evapora durante i processi produttivi e l'acqua potabile utilizzata senza rientro nei corpi idrici. Tale componente è particolarmente rilevante nelle aree caratterizzate da scarsità idrica. L'**acqua verde** quantifica l'acqua piovana immagazzinata nel suolo e utilizzata dalle piante, risultando fondamentale per i prodotti agricoli, in particolare per le colture non irrigue, e consentendo di valutare la dipendenza delle produzioni dalle condizioni climatiche locali. L'**acqua grigia**, infine, rappresenta il volume di acqua necessario a diluire gli inquinanti derivanti da concimi, prodotti fitosanitari, scarichi industriali e altre sostanze chimiche fino al rispetto dei limiti di legge. L'impronta idrica totale si ottiene calcolando separatamente ciascuna componente e sommando i relativi contributi. Questo approccio consente di individuare con maggiore precisione dove si concentra l'impatto principale – consumo diretto, uso agricolo o inquinamento – e di confrontare prodotti e processi in modo più accurato e di definire strategie di riduzione mirate. Un esempio emblematico è rappresentato da una tazza di caffè, la cui impronta idrica deriva dalla combinazione di acqua verde, costituita dalla pioggia assorbita dal suolo e utilizzata dalla pianta di caffè, di acqua blu, impiegata per l'irrigazione artificiale delle piantagioni, e di acqua grigia, necessaria a diluire i concimi utilizzati durante la coltivazione. Il risultato complessivo è un'impronta idrica stimata in circa **140 litri di acqua per una singola tazza di caffè**.

I dissidi in atto per il possesso del bene acqua

Numerosi esempi storici e contemporanei mostrano come il controllo e la gestione dell'acqua siano stati e continuino a essere all'origine di conflitti territoriali, politici ed economici:

Veneto: conflittualità tra Veneziani / Estensi / Papato

Il coraggio della scelta rappresenta un antico e significativo esempio di disputa per il controllo delle risorse idriche. Il **Taglio di Porto Viro** fu una grande opera idraulica realizzata nel Delta del Po dalla Repubblica di Venezia, avviata il 5 maggio 1600 e conclusa il 16 settembre 1604. L'intervento consistette nella deviazione di un ramo del fiume Po, allora noto come Po di Corbola o Po del Mazzorno (detto anche di Longola, e in precedenza Po delle Fornaci, il cui ramo settentrionale era il Po di Tramontana), a partire da Cavanella Po, nei pressi del porto di Loreo, nella Sacca di Goro, mediante lo scavo di un canale lungo circa 7 km che costituisce ancora oggi parte del tracciato dell'attuale Po di Venezia. L'obiettivo principale dell'opera era quello di contenere il continuo apporto di sedimenti verso la laguna veneta, aggravato dalla decisione, sostenuta dal Papato, di far confluire le acque del Reno nel Po su iniziativa dei bolognesi, al fine di limitare la concorrenza dei porti del Ducato d'Este e rafforzare il ruolo commerciale di Venezia nell'Alto Adriatico. I lavori ebbero inizio il 7 giugno 1600 sotto la direzione del provveditore al Taglio di Po Alvise Zorzi e coinvolsero inizialmente circa 70 operai, arrivando nell'arco di pochi anni a impiegare fino a 4.000 lavoratori, organizzati in quattro turni da mille scarriolanti ciascuno. Solo nella seconda metà del XVIII secolo, dopo due conflitti armati, si giunse a una definizione stabile dei rapporti tra la Repubblica di Venezia e il Papato.

Medio Oriente: conflittualità tra Israele / Giordania / Siria / Turchia

Nel Medio Oriente l'acqua rappresenta tuttora uno dei fattori chiave delle tensioni geopolitiche. In quest'area, la competizione per il controllo delle risorse idriche ha spesso inciso in modo determinante sui conflitti, talvolta più dello stesso petrolio. Sebbene solo una quota limitata del bacino del fiume Giordano ricada in territorio israeliano, tale condizione consente a Israele di utilizzare una parte rilevante delle risorse idriche del bacino, a discapito delle popolazioni libanesi, siriane, giordane e palestinesi. Una parte consistente del fabbisogno idrico della Cisgiordania è garantita dalla società israeliana Mekorot; circa il 40% di tale fornitura viene destinata alle aree agricole palestinesi di Hebron e Betlemme. Secondo il rapporto *Acqua e conflitto arabo-israeliano*, ai palestinesi è consentito scavare pozzi con profondità limitata, mentre agli israeliani è permesso raggiungere falde molto più profonde, con un accesso complessivo alle risorse idriche fortemente sbilanciato. L'acqua rimane quindi una questione centrale e irrisolta nel complesso processo di pace dell'area. Parallelamente, Israele ha sviluppato uno dei sistemi tecnologici più avanzati al mondo nel settore idrico. La ricerca e l'innovazione hanno consentito di far fronte a una forte crescita demografica e a uno sviluppo industriale sostenuto, nonostante le condizioni climatiche aride. L'adozione dell'irrigazione a microgoccia, introdotta negli anni Sessanta e oggi diffusa a livello globale, ha

permesso una notevole riduzione dei consumi idrici in agricoltura. A ciò si affianca la realizzazione di grandi impianti di desalinizzazione lungo le coste del Mar Rosso e del Mediterraneo, tra cui quelli di Eilat e Ashkelon, quest'ultimo in grado di coprire una quota significativa del fabbisogno idrico nazionale, integrata dalle risorse delle falde e del lago di Tiberiade.

Africa: Egitto / Sudan / Etiopia / Nigeria

Il bacino del Nilo costituisce uno degli esempi più rilevanti di conflittualità idrica a scala continentale e internazionale. Nel 1970 l'Egitto completò la costruzione della diga di Assuan, un'opera strategica che garantì benefici energetici e agricoli, ma che comportò anche lo sfollamento di circa 100.000 persone e l'inasprimento delle tensioni con i Paesi a monte. Le acque del Nilo sostengono oggi una popolazione in rapida crescita, che entro il 2025 potrebbe raggiungere circa 860 milioni di persone, rendendo la cooperazione tra gli Stati rivieraschi un elemento cruciale per la sicurezza idrica e alimentare dell'intera regione.

Sud-est asiatico: Tibet / Myanmar / Malesia / Laos / Vietnam

Nell'area del Mekong, il rapporto tra acqua, sviluppo e conflitto assume una dimensione particolarmente complessa. Il fiume Mekong, che nasce sull'altopiano tibetano e attraversa Cina, Myanmar, Laos, Cambogia e Vietnam, rappresenta una risorsa fondamentale per l'agricoltura, la pesca e la sussistenza di milioni di persone. La costruzione di grandi dighe, come quella realizzata in Laos nella provincia di Xayaburi, ha prodotto rilevanti effetti ambientali e politici, alterando le rotte migratorie dei pesci e incidendo sulla biodiversità fluviale. La presenza di numerosi sbarramenti lungo il tratto cinese del fiume solleva ulteriori preoccupazioni per la riduzione delle portate verso valle, con effetti diretti sulle coltivazioni vietnamite, già esposte al rischio di intrusione salina marina.

Nord America: U.S.A. / Messico

Anche in Nord America la gestione delle risorse idriche è fonte di tensioni. Il bacino del fiume Colorado rappresenta un caso emblematico di conflittualità tra Stati Uniti e Messico. Il fiume, intensamente sfruttato lungo il suo corso per usi civili, agricoli e industriali, giunge spesso al Golfo di California con portate estremamente ridotte, talvolta insufficienti a soddisfare gli accordi di fornitura per i sistemi irrigui messicani. Questo caso evidenzia come l'eccessivo prelievo idrico possa compromettere sia gli ecosistemi fluviali sia gli equilibri socio-economici e politici tra Paesi confinanti.

Rapporti acqua-suolo

Il suolo rappresenta il principale serbatoio di acqua e la quantità che può trattenere dipende dalla sua natura, in particolare da spessore e tessitura. Il volume di acqua disponibile, cioè utilizzabile dalle piante, è determinato da tre parametri fisici fondamentali: capacità di campo, punto di appassimento e profondità del suolo. In realtà, la dinamica dell'acqua nel suolo è fortemente modulata dalla sua struttura, intesa come l'organizzazione spaziale delle particelle in aggregati, associata a differenti tipologie di pori (micro- e macro-pori) disposti secondo una gerarchia complessa. Micro-aggregati e macro-aggregati si formano grazie a diversi tipi di cementi, in funzione delle caratteristiche pedologiche. Profondità e porosità del suolo mostrano inoltre una marcata variabilità sito-specifica, anche all'interno della stessa azienda agricola. È ampiamente dimostrato che la qualità strutturale dei suoli dipende in larga misura dalle interazioni con la sostanza organica. Quest'ultima, oltre a stabilizzare gli aggregati contro l'azione disgregante dell'acqua, sostiene un'elevata attività biologica che favorisce lo sviluppo della microporosità, costituita da pori con diametro equivalente compreso tra 0,5 e 50 μm , che rappresentano la principale riserva di acqua utile per la crescita delle radici e dei microrganismi. Quando il contenuto di sostanza organica scende sotto il 2%, e ancor più sotto l'1%, la proporzione di tali pori si riduce drasticamente, con una conseguente diminuzione della capacità di ritenzione idrica del suolo.

Numerosi studi hanno dimostrato che l'aumento della microporosità nei suoli arricchiti con materiali organici comporta un incremento della ritenzione idrica e, quindi, della quantità di acqua disponibile per le piante. Questo effetto è attribuibile sia al miglioramento del sistema dei pori e delle condizioni strutturali, sia alla capacità della sostanza organica di assorbire acqua. La ritenzione idrica costituisce pertanto una delle proprietà più rilevanti del suolo e un indicatore primario della sua qualità, strettamente correlato alla crisi idrica, ai periodi di siccità e ai cambiamenti climatici. Si stima che la degradazione dei suoli avvenuta negli ultimi quarant'anni abbia determinato una riduzione fino a circa il 30% della capacità di ritenzione idrica dei suoli italiani, con un conseguente accorciamento dei tempi di risposta idrologica e un aumento della probabilità di eventi calamitosi. Il suolo ha così perso una parte significativa della sua funzione di invaso diffuso, spesso più efficace delle casse di espansione realizzate lungo le aste fluviali.

Negli ultimi anni, in molte aree del Paese, la siccità è accentuata dalla crescente variabilità delle precipitazioni, caratterizzata dall'alternanza di stagioni piovose e siccitose e dalla tendenza delle piogge a concentrarsi in un numero sempre minore di giorni. I cambiamenti climatici si manifestano infatti non solo con un aumento dell'intensità delle precipitazioni, ma anche con un incremento della frequenza e

della durata dei periodi siccitosi. A ciò si associa la degradazione dei suoli, quasi sempre accompagnata da una drastica riduzione del contenuto di sostanza organica, spesso inferiore alla soglia del 2% ritenuta necessaria per garantire una buona fertilità, e in molti casi ormai prossima o inferiore all'1%.

In questo contesto, i danni agricoli legati alla siccità risultano fortemente amplificati dal cattivo stato di salute dei suoli. Il reintegro della sostanza organica è un processo lento e complesso, i cui benefici diventano evidenti solo nel medio-lungo periodo; di conseguenza, non è più procrastinabile l'adozione di strategie di gestione sostenibile del suolo, per evitare che l'attuale degrado evolva verso processi di desertificazione. Va inoltre evidenziato come le lavorazioni tradizionali del terreno possano, nel lungo periodo, contribuire al deterioramento strutturale del suolo, riducendone la capacità di immagazzinare e trattenere acqua. L'esigenza di contenere l'impatto ambientale delle attività agricole ha quindi favorito l'adozione di pratiche alternative, più conservative, rispetto alle lavorazioni convenzionali.

L'abbandono delle rotazioni colturali e la diffusione delle monocolture intensive, in assenza di apporti organici, hanno determinato una forte riduzione della sostanza organica, con conseguente aumento dei fenomeni erosivi e del trasporto di particelle solide e nutrienti verso le acque superficiali. Al contrario, sistemi di lavorazione alternativi alle arature profonde, come la lavorazione minima, la discissura e l'inerbimento nelle colture arboree, migliorano la continuità del sistema dei pori, incrementando sia i pori di riserva idrica sia quelli di trasmissione, favorendo così il movimento dell'acqua e lo sviluppo radicale. La struttura risultante appare più aperta e omogenea lungo il profilo, come confermato dai maggiori valori di conducibilità idraulica misurati nei suoli gestiti con tali pratiche. Le lavorazioni profonde ripetute, invece, riducono la stabilità degli aggregati, favorendo la formazione di croste superficiali e l'aumento del ruscellamento e dei rischi erosivi.

È ormai evidente che l'intensificazione colturale, in particolare per quanto riguarda gli interventi sul terreno, ha spesso superato la soglia di sostenibilità ambientale. Anche sotto il profilo delle emissioni climalteranti, una lavorazione profonda del suolo comporta la perdita di circa 250 kg ha⁻¹ di CO₂, equivalenti alle emissioni di un'automobile Euro 5 per un percorso di circa 1.700 km. Nel lungo periodo, gli effetti negativi delle pratiche agricole intensive possono essere sintetizzati nell'aumento dell'erosione, nella perdita di sostanza organica e biodiversità del suolo, nel compattamento, nell'incremento dei costi di produzione e nei danni ambientali complessivi. Alla luce dei cambiamenti climatici in atto, le lavorazioni intensive del terreno non possono più essere considerate una pratica agricola sostenibile.

Box 1. Rapporti acqua–radice nelle piante

Il primo processo è l'**assorbimento**. L'acqua entra nella pianta principalmente attraverso il sistema radicale, in particolare tramite i peli radicali, che aumentano enormemente la superficie di contatto con il terreno e quindi l'assorbimento. Tipico è il processo di osmosi, cioè il movimento dell'acqua da un terreno più dotato verso le cellule radicali più concentrate in soluti. L'assorbimento dipende da umidità del suolo, salinità, temperatura, aerazione del terreno, le radici infatti necessitano di ossigeno.

Percorsi dell'acqua nella radice. Una volta entrata, l'acqua può muoversi verso il cilindro centrale della radice attraverso tre modalità: la via apoplastica, quella simplastica e trans membrana. Con il primo cammino l'acqua scorre tra le pareti cellulari, senza attraversare le membrane. È il percorso più rapido che si interrompe a livello della banda del Caspary dell'endoderma. Nella seconda l'acqua passa da cellula a cellula attraverso i plasmodesmi e richiede il passaggio ripetuto attraverso le membrane. Nella terza l'acqua che attraversa è più lenta ma molto regolata.

Regolazione dell'ingresso dell'acqua. L'endoderma, con la banda del Caspary, funziona come un "punto di controllo": blocca cioè il passaggio apoplastico, costringe l'acqua a entrare nel simplasto e permette alla pianta di controllare cosa entra nello xilema.

Movimento dell'acqua verso la parte aerea. Una volta nello xilema, l'acqua risale grazie ai rapporti di tensione–coesione generati dalla traspirazione fogliare, oppure per capillarità o pressione radicale.

Funzioni dell'acqua nella pianta. L'acqua è essenziale per il mantenimento del turgore cellulare, il trasporto dei nutrienti, la regolazione della temperatura tramite la traspirazione, consente infine che avvengano delle reazioni metaboliche e la fotosintesi.

L'acqua da risorsa a calamità

È stato spesso osservato come la conoscenza dei fenomeni che si sviluppano sopra la superficie terrestre abbia storicamente ricevuto maggiore attenzione rispetto a quella dei processi che avvengono all'interno del suolo. Nonostante i progressi delle conoscenze scientifiche, questa asimmetria percettiva può essere ritenuta ancora in parte valida per l'opinione pubblica. Il suolo tende infatti a essere considerato quasi esclusivamente in occasione di eventi catastrofici e spesso in modo improprio, richiamando cause di natura esclusivamente geologica, mentre molte calamità sono riconducibili ai processi di erosione e di trasporto che interessano lo strato superficiale del suolo sotto l'azione delle acque. In tale contesto appare necessario richiamare una premessa fondamentale: l'agricoltura rappresenta uno degli ultimi e più efficaci presidi per la tutela e la gestione del territorio. L'analisi dei principali eventi calamitosi verificatisi negli ultimi venticinque anni, e di quelli che con elevata probabilità si manifesteranno in futuro alla luce della crisi climatica in atto, evidenzia una ricorrenza di cause comuni. Nelle aree collinari e montane, la progressiva scomparsa della cultura contadina a partire dalla fine degli anni Sessanta del secolo scorso ha determinato l'abbandono di vaste superfici e la perdita di quelle pratiche di cura del territorio sviluppate nel tempo dagli agricoltori. Tra queste, un ruolo centrale era svolto dalla regimazione idrica diffusa, come i cosiddetti "sciacqui" disposti trasversalmente alle linee di massima pendenza, realizzati manualmente dopo la semina, che consentivano un deflusso controllato delle acque. Tali interventi

permettevano di contenere l'erosione del suolo e di limitare il trasporto di materiale solido, incluso quel fango che entra nel dibattito pubblico quasi esclusivamente in occasione dei disastri. La progressiva scomparsa di queste pratiche ha aumentato la vulnerabilità dei versanti, contribuendo alla trasformazione dell'acqua da risorsa essenziale a fattore di rischio.

Box 2 Alcuni eventi anomali

Sarno (1998). Le colate rapide di fango e detriti che colpirono l'area del Pizzo d'Alvano tra il 5 e il 6 maggio 1998 furono innescate da piogge persistenti su versanti ricoperti da depositi piroclastici: materiali che, al crescere della saturazione, possono perdere rapidamente resistenza e mobilitarsi in colate detritiche ad alta energia. L'evento evidenziò in modo drammatico come, in contesti morfologicamente predisposti, l'innescò non dipenda solo dall'intensità della pioggia, ma anche dalle caratteristiche geologiche e idrogeologiche delle coperture superficiali e dalla gestione del reticolo idrografico minore.

Nota storico-territoriale (Campania). In Campania esistono esempi storici di sistemazioni idrauliche su larga scala, tra cui i Regi Lagni, avviati all'inizio del Seicento (1610) nel contesto del vicereame spagnolo per la canalizzazione e la bonifica di aree soggette a ristagni e inondazioni: un richiamo utile per sottolineare come la regimazione delle acque e la manutenzione del territorio siano temi strutturali e di lungo periodo, non emergenze episodiche.

Ischia (2022) e Giampilieri (2009). A Casamicciola Terme (Ischia), il 26 novembre 2022 una colata di fango e detriti ha seguito linee di impluvio fino all'abitato e al litorale, riaprendo il tema della vulnerabilità idrogeologica in contesti ripidi e densamente antropizzati e della necessità di una cura costante dei versanti e delle opere di regimazione. Un meccanismo analogo, pur in un contesto geomorfologico diverso, è richiamato dall'evento di Giampilieri (Sicilia) del 1° ottobre 2009, quando un nubifragio molto intenso attivò colate di fango che invasero l'abitato: in tali scenari l'abbandono delle sistemazioni tradizionali (tra cui i terrazzamenti) può contribuire ad aumentare l'instabilità superficiale e la connettività dei sedimenti verso valle.

Marche e Romagna. Le più recenti calamità delle Marche (alluvione del 15 settembre 2022 nel bacino del Misa e in bacini limitrofi) e dell'Emilia-Romagna (maggio 2023, con esondazioni diffuse e numerosi dissesti sui versanti) hanno mostrato con evidenza che, quando collina e montagna vengono abbandonate o non adeguatamente gestite, i processi erosivi e gravitativi possono trasferire rapidamente masse solide e acqua verso la pianura, amplificando gli impatti idraulici e i danni.

In sintesi, l'erosione del suolo e il degrado delle sue proprietà fisiche e idrologiche sono destinati ad accrescere il rischio idrogeologico, con implicazioni ancora non pienamente incorporate — in modo sistematico e operativo — negli strumenti normativi e nelle politiche di gestione del territorio a scala nazionale ed europea.

L'abbandono progressivo delle sistemazioni idraulico-agrarie ha indubbiamente determinato un aumento significativo dei deflussi superficiali nei bacini idrografici, con una conseguente crescita del rischio di alluvioni. Ne deriva l'urgenza di avviare programmi strutturati di messa in sicurezza del territorio, fondati sulle conoscenze scientifiche e sulle metodologie operative messe a disposizione dai risultati della ricerca.

Le anomalie climatiche in atto, caratterizzate da una riduzione del numero complessivo di eventi piovosi e da un aumento della loro intensità, rendono l'acqua meteorica meno efficace dal punto di vista agronomico, favorendo al contempo fenomeni sempre più frequenti di ruscellamento superficiale e di allagamento. L'acqua piovana che non viene trattenuta dal suolo non deve tuttavia essere considerata una perdita: al contrario, essa rappresenta una risorsa che, attraverso il ruscellamento o il drenaggio, può contribuire all'alimentazione di serbatoi artificiali.

L'agricoltura italiana offre esempi consolidati di pratiche di *water harvesting*, quali i laghetti collinari diffusi nel Centro Italia o le cisterne interrato delle aree carsiche del Sud, integrate da buone pratiche agronomiche e aziendali finalizzate a una corretta gestione del bilancio idrico.

In questa prospettiva appare necessario **un Piano quadro nazionale per il recupero e lo stoccaggio delle acque**, basato sulla realizzazione di infrastrutture capaci di incrementare le disponibilità idriche. L'alimentazione di tali infrastrutture può essere efficacemente supportata dalle aziende agricole che, attraverso il ripristino delle sistemazioni idrauliche e l'adozione di pratiche agronomiche sostenibili, forniscono un vero e proprio servizio ecosistemico, che la collettività è chiamata a riconoscere e a remunerare.

Le aziende agricole devono quindi essere incentivate e sostenute nell'intraprendere una rinnovata progettazione delle sistemazioni idraulico-agrarie in chiave moderna, affiancata da una gestione sostenibile del suolo (Fig. 1). L'acqua è stata storicamente una delle risorse naturali più abbondanti del pianeta e la sua quantità complessiva si mantiene costante grazie ai processi di rigenerazione che caratterizzano il ciclo idrologico. Tuttavia, i modelli previsionali indicano una crescente conflittualità nell'uso della risorsa qualora dovessero persistere simultaneamente siccità, cambiamenti climatici e trend di aumento dei consumi.



Fig. 1 – Esempio di sistemazione a “piani raccordati”. È un tipo di sistemazione adatta per vigneti e oliveti (ma anche frutteti) in ambienti collinari e prevede una serie di piani separati da ciglioni ciascuno con pendenza opposta in modo da raccordare ad una estremità con il piano sottostante e dall'altra con il piano soprastante in modo da consentire l'agevole circolazione delle macchine agricole.

Tali dinamiche hanno imposto nel tempo una revisione delle politiche pubbliche sull'acqua. In ambito europeo, un ruolo centrale è stato svolto dalla Direttiva Quadro sulle Acque 2000/60/CE, che ha sancito l'applicazione del principio del recupero dei costi dei servizi idrici e l'adozione di misure volte a includere nel prezzo

dell'acqua il costo complessivo dei servizi ad essa connessi. La mancata piena integrazione delle problematiche sociali legate all'accesso all'acqua come diritto umano fondamentale ha tuttavia contribuito ad acuire le conflittualità, rendendo improrogabile una revisione del quadro normativo che differenzi le modalità di gestione della risorsa in funzione delle diverse destinazioni d'uso.

Proprio per affrontare la scarsità idrica e ridurre la pressione sulle fonti di approvvigionamento, la Commissione Europea ha individuato nel riutilizzo delle acque reflue una strategia prioritaria da promuovere nell'Unione Europea. Il riuso delle acque reflue in agricoltura, associato al recupero dei nutrienti, consente di ridurre l'impiego di fertilizzanti minerali e il carico inquinante sulle acque superficiali, purché siano attentamente valutati e gestiti i rischi connessi, al fine di garantire la tutela della salute pubblica, dell'ambiente e l'idoneità agronomica. Gli obiettivi di qualità devono pertanto essere definiti all'interno di specifici quadri normativi. Tra le diverse forme di riutilizzo, l'acqua di vegetazione dei frantoi oleari rappresenta una risorsa di particolare interesse, soprattutto nel settore agroalimentare, per il contenuto di composti a elevato valore nutraceutico e salutistico.

In sintesi, la variabilità delle precipitazioni, caratterizzata dall'alternanza di stagioni piovose e stagioni secche, è profondamente mutata. Le piogge tendono a concentrarsi in un numero sempre minore di giorni, dando luogo a eventi estremi spesso fortemente localizzati, che possono risultare devastanti a scala locale pur non incidendo in modo significativo sui bilanci idrologici regionali o nazionali. Tale estrema localizzazione rende inoltre difficile, se non impossibile, una previsione accurata di questi eventi.

L'impatto dei cambiamenti climatici sul suolo è particolarmente rilevante: negli ultimi vent'anni si stima che l'aggressività delle piogge, intesa come energia cinetica delle gocce d'acqua all'impatto con la superficie del suolo, sia aumentata in modo sostanziale. Il suolo è un sistema poroso, ma la dimensione ridotta dei pori limita la capacità di infiltrazione quando l'intensità di precipitazione supera la conducibilità idraulica del profilo. In condizioni di pioggia intensa, l'impatto delle gocce può provocare la disgregazione degli aggregati superficiali e l'occlusione dei micropori, con una drastica riduzione dell'infiltrazione. In tali circostanze, una quota molto elevata dell'acqua piovana viene persa per ruscellamento superficiale o genera allagamenti, in funzione della pendenza e della morfologia del terreno. In pianura, i fenomeni di allagamento sono spesso accentuati da sistemi colturali basati su monoculture e lavorazioni profonde ripetute, che determinano la formazione di uno strato compatto al limite inferiore dell'aratura (suola di lavorazione), ostacolando il drenaggio verticale. Risulta quindi necessario ripensare i sistemi colturali, reintroducendo rotazioni adeguate e intervenendo sulla rimozione degli strati compattati mediante pratiche quali la ripuntatura (Fig. 2).

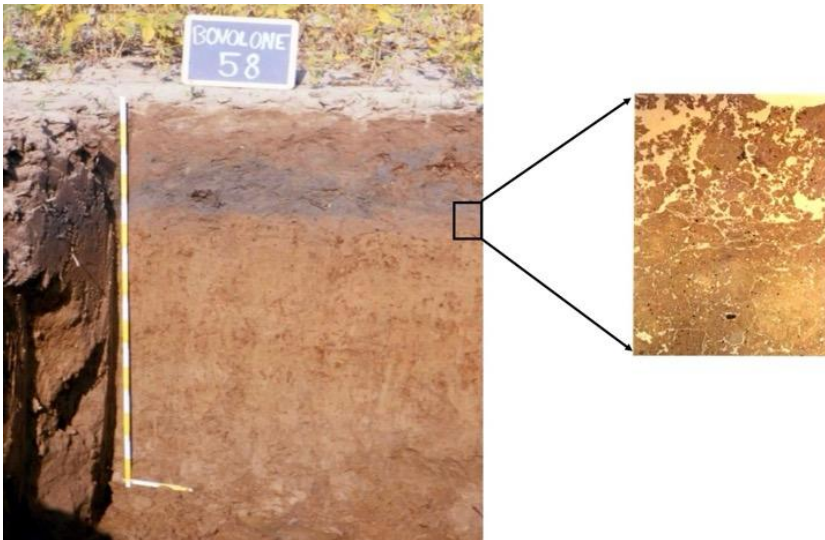


Fig. 2 – Esempio di suola d’aratura. Nel profilo di suolo (foto a destra) appare evidente il limite inferiore dell’aratura; il colore grigio al di sopra è indice di ristagno idrico. La foto a sinistra mostra la macrofotografia di una sezione sottile verticalmente orientata preparata da un campione di suolo prelevato nello strato indicato dal riquadro nel profilo, cioè al limite inferiore della lavorazione di un terreno franco argilloso sottoposto ad aratura convenzionale continua. Le parti chiare rappresentano i pori; è evidente la loro discontinuità in senso verticale con conseguente interruzione del drenaggio idrico. Nella realtà il lato minore misura 3 cm.

L’acqua è una risorsa preziosa e non deve essere sprecata; tuttavia, può trasformarsi in calamità sia in condizioni di eccesso, sia in situazioni di grave carenza, come avviene durante le sempre più frequenti crisi di siccità. L’aumento del numero e della durata dei periodi siccitosi sta producendo impatti differenziati sul territorio, colpendo non solo l’agricoltura, ma anche vasti ecosistemi forestali che mostrano evidenti segnali di stress idrico.

Come già evidenziato, risultano quindi indispensabili programmi e azioni finalizzate a ridurre le perdite idriche e a favorire lo stoccaggio dell’acqua, anche attraverso il ricorso a serbatoi artificiali. Questa crisi climatica non si è manifestata improvvisamente: da oltre vent’anni la comunità scientifica sottolinea la tangibilità dei cambiamenti climatici e i loro effetti sul suolo, evidenziando da un lato l’aumento della frequenza e dell’intensità degli eventi piovosi concentrati e dei conseguenti rischi erosivi, e dall’altro l’incremento della frequenza e della durata dei periodi di siccità, i cui impatti sull’agricoltura e sugli ecosistemi forestali erano stati ampiamente previsti.

L’acqua e le variazioni climatiche

Variazioni in aumento della temperatura

Negli ultimi decenni, il riscaldamento medio globale ha mostrato un marcato incremento. In Europa il tasso di aumento della temperatura è risultato circa doppio rispetto alla media globale a partire dagli anni '80. Il bacino del Mediterraneo è

riconosciuto come un hotspot climatico: la regione si scalda mediamente più rapidamente della media planetaria, con una marcata amplificazione estiva. Le valutazioni recenti indicano che l'Europa ha già superato circa 2 °C di riscaldamento rispetto al periodo pre-industriale (1850-1900), mentre per l'area mediterranea gli incrementi sono tipicamente prossimi a circa 1,5 °C, con differenze fra sottoregioni e stagioni. Ciò si traduce in estati sempre più lunghe e calde, con ondate di calore più frequenti, intense e persistenti, ma anche in inverni più miti e con minore copertura nevosa alle medie e alte quote.

Gli anni 2022-2025 rappresentano una sequenza emblematica: l'estate 2022 è stata la più calda mai registrata in Europa, con anomalie termiche marcate su Italia e Mediterraneo e un forte deficit di umidità dei suoli; il 2024 è stato l'anno più caldo a scala globale e il più caldo mai registrato per l'Europa nel suo complesso, con lunghi periodi di stress termico e bilanci di massa glaciale negativi in diverse aree montane europee. Nel 2025, pur con forte variabilità spaziale, si sono riproposte in varie aree mediterranee condizioni di elevata domanda evaporativa e stress idrico. Parallelamente, si è osservata una forte crescita delle notti tropicali "*tropical nights*" (temperature minime pari o superiori a 20 °C) nelle città mediterranee, con importanti ripercussioni su salute, consumi energetici e produttività del lavoro.

Per l'agricoltura, l'aumento delle temperature agisce su più livelli. Anticipa fasi fenologiche chiave (germinazione, fioritura, maturazione), riorganizza i calendari colturali e accorcia la durata del ciclo, con potenziali perdite di resa soprattutto per i cereali autunno-vernini. Nei frutteti l'accumulo insufficiente di freddo invernale riduce l'omogeneità della fioritura e peggiora la qualità dei frutti. Le ondate di caldo in fioritura o riempimento granella possono compromettere in pochi giorni il lavoro di un'intera stagione.

Dal punto di vista idrologico, temperature più elevate incrementano evapotraspirazione: a parità di pioggia, i suoli si asciugano più rapidamente, si allungano e intensificano gli episodi di siccità agricola ed eco-idrologica, mentre crescono fabbisogni irrigui e competizione fra usi civili, agricoli ed energetici. Il riscaldamento altera anche la criosfera: la riduzione di neve e ghiaccio nelle Alpi rende più "volatile" la disponibilità idrica, concentrando i deflussi in eventi di piena precoce e riducendo l'apporto estivo di acque di fusione.

In sintesi, l'aumento della temperatura nell'area mediterranea comporta una trasformazione strutturale del regime climatico: più giorni estremi, maggiore variabilità intra-annuale, stagioni di crescita potenzialmente più lunghe ma più rischiose. Questo contesto richiede un ripensamento integrato dei sistemi colturali, delle infrastrutture idriche e delle politiche territoriali, per trasformare l'adattamento al caldo in un'occasione di innovazione e non solo in una continua gestione dell'emergenza.

Desertificazione: aree a rischi

Negli ultimi anni i rapporti UNCCD (United Nations Convention to Combat Desertification) e le valutazioni europee del rischio climatico convergono nel collocare il Mediterraneo fra gli “hotspot” globali della siccità: qui la combinazione di aumento delle temperature, diminuzione (o maggiore irregolarità) delle precipitazioni e pressioni antropiche sugli ecosistemi sta accelerando l’inaridimento dei paesaggi agrari.

A scala mondiale si stima che oltre un terzo delle terre emerse sia già interessato da processi di desertificazione o a rischio elevato di degradazione; centinaia di milioni di persone dipendono direttamente da suoli la cui funzionalità idrologica e produttiva è in rapido declino. Nel bacino mediterraneo, e in particolare nei paesi del Nord Africa e del Medio Oriente, la perdita di fertilità dei suoli, la salinizzazione e l’erosione stanno riducendo la resilienza dei sistemi agricoli tradizionali, alimentando migrazioni interne e conflitti per l’accesso all’acqua.

L’Italia non è esente da queste dinamiche: le più recenti valutazioni nazionali indicano come particolarmente vulnerabili le regioni meridionali, le isole e vari settori delle pianure costiere e dei versanti collinari, dove si sommano forte pressione irrigua, consumo di suolo, abbandono delle sistemazioni idraulico-agrarie e riduzione della sostanza organica nel terreno. Già nei primi anni 2000 circa il 30% del territorio nazionale veniva classificato a rischio di desertificazione; aggiornamenti recenti confermano un aggravarsi della situazione in ampie porzioni del Mezzogiorno e delle isole maggiori.

Dal punto di vista geomorfologico e idrologico, la desertificazione in area mediterranea si manifesta attraverso l’aumento dell’erosione del suolo, il dilavamento dei suoli superficiali più fertili, la riduzione dell’infiltrazione e ritenzione idrica, la comparsa di forme di incisione concentrate (solchi di erosione) e la perdita di copertura vegetale per stress idrico cronico. Questo comporta una riduzione della capacità di invaso diffuso del paesaggio, con effetti a cascata sui deflussi di piena e sulla ricarica delle falde.

Le strategie di contrasto individuate a livello internazionale vanno nella direzione di un approccio integrato: conservazione del suolo (agricoltura conservativa, agroforestazione, ripristino di terrazzamenti e sistemazioni idraulico-agrarie), uso efficiente dell’acqua (irrigazione di precisione, riuso sicuro delle acque reflue, invasi multifunzionali), tutela della biodiversità agricola e dei saperi locali. L’orizzonte non è tanto “fermare il deserto” quanto ripristinare la funzionalità idrologica ed ecologica dei sistemi agricoli, rendendoli capaci di convivere con un clima più caldo e variabile.

Disponibilità idrica

L’aumento delle temperature e la trasformazione del regime delle precipitazioni stanno ridisegnando la geografia della disponibilità idrica a scala globale e, in modo

particolarmente evidente, in Europa e nel Mediterraneo. I più recenti rapporti dell’Agenzia Europea dell’Ambiente e del servizio Copernicus mostrano come negli ultimi anni si siano intensificati gli episodi di siccità idrologica e agricola, con un’estensione senza precedenti nel 2022 e nel 2025. In parallelo, cresce la frequenza di periodi piovosi estremi e di piene improvvise: una convivenza di “*too little*” e “*too much water*” che rende sempre più complessa la gestione delle risorse.

In Europa circa il 30% della popolazione vive già in aree con stress idrico strutturale, percentuale che nelle regioni meridionali e turistiche può superare il 70% in estate. Nel Mediterraneo le proiezioni IPCC indicano una riduzione media delle precipitazioni, soprattutto estive, dell’ordine del 4% per ogni grado di riscaldamento globale, accompagnata da un aumento dell’aridità e dei periodi di siccità prolungata. In Italia gli ultimi anni hanno alternato stagioni con deficit di neve e portate fluviali ai minimi storici (come nel 2022, con la crisi del Po) ad episodi di piogge intense che hanno prodotto alluvioni diffuse nel 2023–2024, senza però compensare pienamente la ricarica di falde e invasi.

La disponibilità idrica utile non dipende infatti solo dai volumi annuali di precipitazione, ma dalla loro distribuzione nel tempo, dall’efficienza del sistema suolo–vegetazione nel trattenere e rilasciare l’acqua, e dalle infrastrutture di stoccaggio e distribuzione. Sistemi idrici progettati su un clima “del passato” si trovano oggi a dover fronteggiare una maggiore variabilità, con periodi prolungati di scarsità seguiti da eventi estremi che superano rapidamente le capacità di invaso e drenaggio. Ne derivano perdite consistenti per evaporazione, sversamenti di emergenza e, talvolta, danni alle opere stesse.

Le risposte discusse a livello europeo e nazionale si muovono lungo tre direttrici principali. La prima riguarda la riduzione delle perdite e l’aumento dell’efficienza lungo l’intera filiera, dagli acquedotti (ancora caratterizzati in Italia da quote di dispersione molto elevate) ai distretti irrigui, promuovendo tecniche di irrigazione di precisione e sistemi di supporto alle decisioni basati su telerilevamento e modelli eco-idrologici. La seconda è lo sviluppo di nuove fonti: riuso sicuro delle acque reflue depurate, desalinizzazione in contesti costieri, raccolta diffusa delle acque meteoriche (“*water harvesting*”) integrata con le pratiche agronomiche (es. invasi per lo stoccaggio dell’acqua). La terza è la cosiddetta “gestione della domanda”: incentivi a colture e sistemi colturali meno idro-esigenti, revisione dei criteri di allocazione fra usi agricoli, civili, industriali ed ecosistemici, introduzione di tariffe e strumenti economici che riflettano meglio il valore dell’acqua, senza comprometterne il riconoscimento come diritto umano fondamentale.

L’acqua in Italia

La piovosità media annua sul territorio italiano è storicamente superiore alla media mondiale. In termini teorici, quindi, la risorsa idrica non risulta carente, ma necessita

di essere adeguatamente salvaguardata e gestita. La disponibilità annua di acqua per usi civili e produttivi è stimata in circa **2.700 m³ pro-capite**, per un volume complessivo di circa **155·10⁹ m³**. In Italia, circa il **97% dell'acqua dolce** è immagazzinato nelle falde acquifere, in larga parte alimentate da territori sottoposti a tutela ambientale; tuttavia, l'irregolarità dei deflussi e le inefficienze del sistema riducono la disponibilità effettiva a circa il **71%**, pari a **2.000 m³ pro-capite**. La disponibilità idrica è in progressivo calo, mentre aumentano le aree soggette a emergenza idrica e crescono rapidamente i costi e i prezzi dell'acqua. Circa il **15% della popolazione italiana** (circa 8 milioni di persone) vive per quattro mesi l'anno, tra giugno e settembre, al di sotto della soglia del fabbisogno idrico minimo. Le perdite lungo le reti sono elevate: circa il **30% dell'acqua** immessa negli acquedotti non raggiunge gli utenti finali, mentre nel settore irriguo si perde fino al **40% dell'acqua** lungo le infrastrutture di adduzione e distribuzione, a fronte di un uso agricolo che rappresenta mediamente il **70% dei consumi totali**. Nel bacino del Mediterraneo, Italia compresa, nell'ultimo secolo si è registrata una riduzione delle precipitazioni estive di circa il **20%**, accompagnata da un aumento delle temperature compreso tra **1,5 e 1,8 °C**. L'anomalia climatica attuale consiste nel fatto che all'incremento termico non corrisponde un aumento delle precipitazioni, che tendono invece a concentrarsi in eventi brevi e intensi, responsabili di piene fluviali e inondazioni eccezionali. La combinazione di penuria idrica e precipitazioni improvvise e torrenziali rappresenta una minaccia crescente per l'uomo, per gli ecosistemi e per la sostenibilità delle produzioni agricole.

Cambiamenti del clima e biodiversità

Un elemento di fondo che incide in modo determinante sugli equilibri ambientali è rappresentato dall'incremento della popolazione mondiale. Secondo le proiezioni demografiche, intorno al 2080 potrebbe iniziare una fase di rallentamento della crescita, ma la popolazione globale avrà probabilmente raggiunto valori prossimi ai 10 miliardi di individui, soglia considerata critica in termini di sostenibilità per il pianeta. Tale pressione demografica rappresenta un fattore di rischio almeno comparabile, per impatto potenziale, a quello del cambiamento climatico.

Indipendentemente dall'evoluzione futura del clima, la biodiversità è destinata a subire una contrazione a causa dell'espansione delle attività umane, dell'intensificazione degli usi antropici del suolo e della progressiva riduzione e frammentazione degli habitat naturali. I cambiamenti climatici si sovrappongono a questi processi, amplificandone gli effetti sugli ecosistemi terrestri. In particolare, lo spostamento degli ecosistemi verso latitudini più elevate e quote maggiori comporterà una selezione naturale delle specie: quelle incapaci di adattarsi rapidamente o di migrare efficacemente saranno maggiormente esposte al rischio di estinzione.

Le specie più sensibili alla disponibilità e alla qualità dell'acqua risultano particolarmente vulnerabili, con un rischio accentuato per numerosi mammiferi e uccelli delle regioni subtropicali. Parallelamente, la produzione di biomassa e l'espansione delle foreste potrebbero aumentare alle alte latitudini; tuttavia, in molte aree i principali fattori limitanti saranno rappresentati dal rischio di desertificazione e dalla ridotta disponibilità di acqua e nutrienti nei suoli.

Sulla base delle proiezioni degli scenari climatici elaborate dall'IPCC, le principali criticità attese per l'area mediterranea, e per l'Italia in particolare, includono una crescente disomogeneità nella disponibilità di risorse di acqua dolce tra Nord e Sud Europa e tra Nord e Sud del Paese, legata a differenti regimi di precipitazione; la migrazione dei sistemi ecologici verso latitudini più elevate, con conseguenti trasformazioni del paesaggio nel contesto europeo e mediterraneo; e un aumento della vulnerabilità degli ambienti costieri e marini, dovuto all'innalzamento del livello del mare e all'aumento della temperatura delle acque, con ripercussioni sia sugli ecosistemi naturali sia sulle attività umane.

Innalzamento del livello del mare e popolazioni a rischio

I profughi climatici e il destino delle isole basse: l'esempio di Tuvalu

Tuvalu, piccolo Stato insulare del Pacifico, rappresenta uno dei casi più emblematici degli effetti dei cambiamenti climatici sui territori a bassissima quota. Con una popolazione di poco superiore ai 10.000 abitanti, una superficie complessiva inferiore ai 30 km² e una densità di oltre 300 abitanti per km², Tuvalu è tra le nazioni meno popolate e meno estese al mondo. Situata nell'Oceania, a circa 3.400 km a nord-est dell'Australia, è costituita da un arcipelago di atolli corallini che emergono di pochi metri sopra il livello medio del mare.

Il territorio è formato da isole basse circondate da barriere coralline, ecosistemi estremamente vulnerabili all'innalzamento del livello marino e all'aumento dell'energia del moto ondoso. Da decenni la comunità scientifica segnala come tali sistemi insulari siano esposti a un progressivo rischio di sommersione, legato all'innalzamento del livello degli oceani, all'erosione costiera e alla salinizzazione delle falde di acqua dolce. Questi fenomeni sono ormai percepibili anche dalla popolazione locale, che osserva un aumento delle inondazioni durante le maree eccezionali e una crescente difficoltà nel mantenimento delle risorse idriche e agricole.

Secondo le proiezioni climatiche, l'atollo principale di Funafuti potrebbe subire, entro la metà del secolo, un'estesa perdita di aree emerse in occasione di eventi di alta marea e mareggiate, mentre entro la fine del secolo gran parte del territorio potrebbe diventare permanentemente inabitabile in assenza di misure di adattamento efficaci. Un destino analogo è prospettato per altri Stati insulari a bassa quota del Pacifico e dell'Oceano Indiano, come Kiribati, Tonga, Figi e le Maldive.

Il caso di Tuvalu evidenzia in modo particolarmente chiaro come il cambiamento climatico non rappresenti soltanto una questione ambientale, ma anche una sfida territoriale, sociale e geopolitica, ponendo interrogativi concreti sul futuro di intere comunità e sulla gestione dei fenomeni di perdita di territorio, migrazione forzata e tutela degli ecosistemi insulari.

L'Australia e l'accordo per i diritti di Tuvalu

Tuvalu è considerato uno dei primi Stati al mondo che potrebbe trovarsi nella condizione di dover pianificare, nel corso dei prossimi decenni, una riallocazione progressiva dell'intera popolazione a causa degli effetti del cambiamento climatico. Questa prospettiva apre interrogativi inediti sul futuro di numerose altre nazioni vulnerabili, la cui stessa continuità territoriale e statale risulta sempre più messa in discussione dall'innalzamento del livello del mare e dalla perdita di abitabilità dei territori.

In tale contesto, l'Australia ha avviato una collaborazione istituzionale con il governo di Tuvalu, dando vita a un programma innovativo di mobilità e tutela dei diritti, noto come *Pacific Engagement Visa*. L'accordo prevede la possibilità di un ingresso regolato e pianificato di cittadini tuvaluani sul territorio australiano, configurando uno dei primi esempi di migrazione climatica riconosciuta e organizzata a livello statale, con potenziali primi trasferimenti previsti entro la metà del decennio. Si tratta di un caso senza precedenti nella storia contemporanea, in cui la migrazione non è una risposta emergenziale ma una strategia di adattamento pianificata.

Parallelamente, il dibattito internazionale sul cambiamento climatico ha registrato un passaggio di rilievo anche sul piano giuridico. Nel luglio 2025, la Corte Internazionale di Giustizia, massimo organo giurisdizionale delle Nazioni Unite, ha espresso un pronunciamento di grande rilevanza, riconoscendo il cambiamento climatico come una minaccia di natura esistenziale e affermando l'esistenza di obblighi specifici in capo agli Stati per prevenirne e ridurne gli effetti. Pur nel quadro di un parere consultivo, tale posizione contribuisce a rafforzare il fondamento giuridico delle politiche climatiche e delle responsabilità internazionali, con potenziali implicazioni anche per la tutela dei Paesi e delle popolazioni più esposte agli impatti del riscaldamento globale.

Un esempio particolarmente significativo degli effetti dei cambiamenti climatici alterati si osserva in Marocco, dove la combinazione tra crisi climatica e modelli di agricoltura intensiva sta determinando un progressivo impoverimento e, in alcuni casi, il prosciugamento delle oasi. Le oasi, spesso definite "roccaforti di vita nel deserto", rappresentano microclimi unici in cui la disponibilità di acqua ha consentito, nel tempo, lo sviluppo di elevati livelli di biodiversità e la costruzione di sistemi socio-culturali e produttivi strettamente integrati con l'ambiente. In questi contesti, le comunità locali hanno storicamente operato in equilibrio con la natura, elaborando strategie agricole, economiche e culturali capaci di garantire la sopravvivenza in un ambiente caratterizzato da condizioni climatiche estreme.

Box 3. Effetti sulla produzione agricola

Il rapporto tra acqua e suolo è uno dei fattori più determinanti per la produttività agricola. L'acqua non è solo un elemento necessario per la vita vegetale, regola i processi fisiologici, influenza la disponibilità dei nutrienti e determina la struttura e la fertilità del suolo.

Ruolo dell'acqua nelle piante. Secondo Finapp⁴, l'acqua costituisce circa l'80% delle piante erbacee e il 50% delle piante legnose, ed è essenziale per processi come traspirazione, fotosintesi e trasporto dei nutrienti.

Ruolo del suolo. Il suolo fornisce ancoraggio alle radici, disponibilità di nutrienti e capacità di trattenere e rilasciare acqua in modo equilibrato.

Come l'acqua interagisce con il suolo si constatano diversi effetti.

Effetti positivi

Idratazione ottimale → crescita regolare, fotosintesi efficiente

Mobilità dei nutrienti → l'acqua scioglie e trasporta elementi nutritivi

Attività biologica → favorisce il microbioma utile del terreno

Effetti negativi

Carenza d'acqua (stress idrico)

Riduzione della fotosintesi

Minore accrescimento e resa di prodotto

Aumento della vulnerabilità alle fitopatie

Riduzione della qualità dei prodotti (es. frutti più piccoli)

La siccità è oggi una delle principali minacce, aggravata dai cambiamenti climatici.

Eccesso d'acqua

Asfissia radicale

Riduzione dell'assorbimento dei nutrienti

Aumento di malattie fungine

Lisciviazione dei fertilizzanti

Impatti sulla produzione agricola

Effetti diretti: riduzione delle rese, infatti la disponibilità idrica è direttamente proporzionale alla produttività delle colture. Qualità inferiore: zuccheri, proteine e consistenza dei prodotti dipendono dall'acqua. Maggiore variabilità produttiva: eventi estremi (siccità, alluvioni) rendono instabili le produzioni.

Effetti indiretti: aumento dei costi (irrigazione, gestione emergenze), maggiore uso di fertilizzanti e pesticidi in condizioni di stress idrico, pressione sulle risorse idriche, soprattutto in aree mediterranee.

Gestione sostenibile acqua-suolo

Secondo il CREA e altre fonti, una gestione efficiente dell'acqua è oggi indispensabile. Ecco le tecniche più efficaci e disponibili:

Irrigazione di precisione (goccia, sensori)

Ammendanti organici per aumentare la capacità idrica del suolo

Pacciamatura per ridurre evaporazione

Avvicendamenti e colture tolleranti/resistenti alla siccità

Recupero e riuso delle acque reflue depurate (in Italia oggi lo si usa solo nel 4,6% dei terreni irrigui).

Negli ultimi decenni, tuttavia, la riduzione delle precipitazioni e l'aumento delle temperature, associati all'espansione di coltivazioni intensive orientate all'esportazione, come quelle del dattero e dell'argan⁵, stanno mettendo sotto forte pressione questi sistemi fragili. Pur trattandosi di colture relativamente resistenti allo stress climatico, esse comportano un consumo idrico elevato e richiedono un utilizzo intensivo delle risorse del suolo, spesso incompatibile con la capacità di carico degli ecosistemi oasiani. Ne deriva un rischio crescente di degrado ambientale, perdita di biodiversità e compromissione dei servizi ecosistemici, con ripercussioni dirette sulle comunità che da secoli abitano e gestiscono questi territori.

⁴Finapp, startup italiana e spin-off dell'Università di Padova ha sviluppato una tecnologia innovativa per misurare l'acqua nel suolo e nella neve utilizzando i raggi cosmici. La loro tecnologia si basa su sonde CRNS (Cosmic Ray Neutron Sensing), capaci di rilevare l'umidità del terreno in modo non invasivo, su larga scala e in tempo reale.

⁵ L'argan o argania (*Sideroxylon spinosum* L.) è un albero appartenente alla famiglia delle Sapotaceae, diffuso nella parte occidentale del Nord Africa che produce un pregiato olio cosmetico da esportazione.

Nuove attese dalla ricerca genetica

Resistenza allo stress idrico

Tra gli obiettivi prioritari affidati alla ricerca genetica applicata all'agricoltura assume un ruolo centrale il miglioramento della resistenza allo stress idrico, considerata una delle principali limitazioni alla stabilità produttiva dei sistemi agricoli in un contesto di cambiamento climatico. Secondo uno studio pubblicato nel 2021 sul *Journal of Environmental Economics and Management*, condotto da un gruppo di ricerca della Boston University, dell'Università Ca' Foscari Venezia e della Fondazione Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici, qualora l'agricoltura non riuscisse ad adattarsi efficacemente agli effetti del cambiamento climatico, la produzione alimentare globale potrebbe subire una riduzione di circa il 10% entro la metà del secolo e fino al 25% entro la fine del secolo, facendo riferimento allo scenario più pessimista elaborato dall'IPCC. Migliorare la risposta delle colture a condizioni di stress ambientale rappresenta una sfida complessa, ma oggi il miglioramento genetico può avvalersi di tecniche innovative e più efficienti rispetto al passato. In particolare, quando la ricerca di base riesce a identificare i meccanismi molecolari che regolano la risposta delle piante a stress idrici e termici, si aprono prospettive applicative di grande interesse. Tali conoscenze costituiscono infatti il presupposto per lo sviluppo di nuove varietà e colture agrarie capaci di mantenere livelli produttivi accettabili in condizioni di riscaldamento globale, contribuendo in modo sostanziale alle strategie di adattamento dell'agricoltura ai cambiamenti climatici.

Box 4. Un recente studio pubblicato su *Science* (“*A dirigent protein complex directs lignin polymerization and assembly of the root diffusion barrier*”) ha portato all’identificazione di un complesso proteico coinvolto nel controllo del flusso di acqua e nutrienti all’interno delle radici. I risultati mostrano come specifiche proteine dirigenti, localizzate a livello dell’endoderma radicale, svolgano un ruolo determinante nella corretta deposizione della lignina, contribuendo alla formazione di una barriera di diffusione nota come banda di Caspary. Questa struttura rappresenta un elemento chiave nel controllo selettivo dell’assorbimento radicale, poiché impedisce il passaggio apoplastico non regolato di acqua e soluti, costringendoli ad attraversare le membrane cellulari e consentendo così un controllo fine dell’equilibrio idrico e nutrizionale della pianta. La regolazione della polimerizzazione della lignina nella banda di Caspary risulta quindi essenziale per mantenere l’acqua all’interno del sistema radicale e per modulare l’assorbimento dei nutrienti dal suolo. In un contesto caratterizzato da temperature record e da una crescente irregolarità delle precipitazioni, la comprensione dei meccanismi molecolari che governano l’architettura e la funzionalità delle radici assume un’importanza strategica. Come sottolineato da G. Castrillo della University of Nottingham, l’approfondimento di questi processi rappresenta un passaggio fondamentale per orientare futuri interventi di miglioramento genetico, finalizzati a garantire la stabilità delle produzioni agricole e la sicurezza alimentare in condizioni di crescente stress climatico. A questo fine gli apparati radicali assumono una particolare rilevanza (Fig. 3).



Fig. 3 - Radici di soia osservate con il metodo del minirizotrone.

È la pianta e i suoi invisibili a rigenerare il terreno e non viceversa!

Questo studio risulta di particolare interesse poiché l’endoderma⁶ radicale è riconosciuto come un tessuto chiave nella protezione della pianta contro l’ingresso indiscriminato di acqua e soluti dal suolo verso il cilindro centrale della radice. La ricerca evidenzia inoltre come una corretta architettura radicale non sia rilevante soltanto per il controllo dell’assorbimento idrico e nutrizionale, ma giochi un ruolo fondamentale anche nelle risposte ai diversi tipi di stress ambientale. È stato infatti osservato che piante caratterizzate da un’alterata espressione di una o più delle proteine coinvolte nella formazione della barriera endodermica mostrano un accrescimento significativamente ridotto sia a livello radicale sia del fusto, in risposta a molteplici condizioni di stress, non limitate alla salinità e all’esposizione ai metalli pesanti, ma estese anche alla siccità. La sfida posta dai cambiamenti climatici

richiede lo sviluppo di piante capaci di resistere in modo più efficiente agli stress ambientali. Ciò rende indispensabile una conoscenza approfondita dell'organizzazione strutturale e funzionale dei tessuti vegetali. In questo contesto, lo studio che ha identificato un complesso proteico responsabile della regolazione della polimerizzazione della lignina — polimero di natura fenolica che forma una rete tridimensionale altamente impermeabile a livello dell'endoderma radicale — fornisce un contributo fondamentale alla comprensione dei meccanismi di adattamento delle piante. Tali conoscenze aprono prospettive concrete per future strategie di miglioramento genetico mirate a rafforzare la tolleranza delle colture alle condizioni ambientali estreme imposte dal riscaldamento globale.

⁶ L'endoderma, è un tessuto tegumentale interno delle piante che avvolge come un mantello protettivo la parte interna della radice. "Potremmo definirla come una sorta di "pelle" interna della pianta ("*plant inner skin*") localizzata a livello della radice. Questa struttura è caratterizzata dalla presenza della cosiddetta **banda di Caspary** (primo naturalista che la descrisse, 1865). Si tratta cioè di una **fascia continua che si estende lungo le pareti radiali e trasversali delle cellule dell'endoderme**.

Resistenza allo stress salino

I cambiamenti climatici e le pratiche irrigue intensive stanno accelerando la salinizzazione dei suoli agricoli, soprattutto nelle pianure costiere, nelle oasi e nei sistemi irrigui che dipendono da acque di qualità mediocre. A scala globale si stima che oltre 1 miliardo di ettari sia interessato da salinità e sodicità in misura tale da ridurre produttività e biodiversità, con un incremento annuale di alcuni milioni di ettari. Il problema è particolarmente acuto nelle regioni aride e semi-aride, dove l'evaporazione supera di molto le precipitazioni e l'innalzamento del livello del mare favorisce l'intrusione del cuneo salino nelle falde e lungo gli estuari fluviali (Fig. 4).

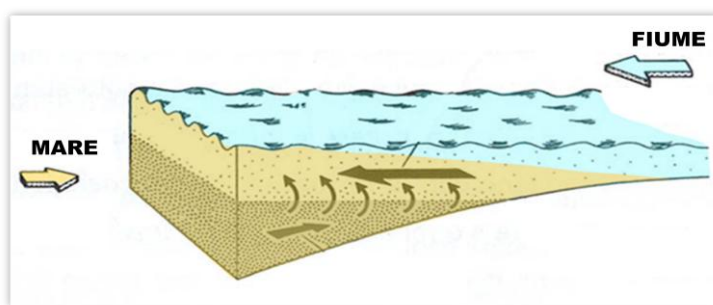


Fig. 4 – Il cuneo salino (modello)

I meccanismi attraverso cui le piante rispondono allo stress salino sono molteplici e includono:

- una componente osmotica, che riduce il potenziale idrico della soluzione del suolo e ostacola l'assorbimento di acqua;
- la tossicità ionica, dovuta all'accumulo di Na^+ e Cl^- nei tessuti;

- squilibri nutrizionali, con interferenze nell'assorbimento e nel trasporto di K^+ , Ca^{2+} e micronutrienti;
- (iv) l'aumento di specie reattive dell'ossigeno (ROS), con danni ossidativi a membrane e macromolecole;
- alterazioni del metabolismo primario e della regolazione stomatica e fotosintetica.

La tolleranza è determinata dalla capacità di escludere o limitare l'ingresso di Na^+ a livello radicale, sequestrare gli ioni nel vacuolo (compartimentazione), mantenere l'omeostasi ionica nei tessuti fogliari—preservando un elevato rapporto K^+/Na^+ —e sostenere l'efficienza fotosintetica e i processi di detossificazione antiossidante.

Sul fronte del miglioramento genetico, le strategie spaziano dall'utilizzo di risorse genetiche di specie e varietà tradizionali naturalmente più tolleranti, all'introggressione di geni chiave (trasportatori ionici, regolatori di osmoregolazione, fattori di trascrizione) fino alle più recenti tecniche di genome editing. Il riso costituisce un modello di riferimento: evidenze recenti indicano che l'integrazione di alleli per la gestione di Na^+/Cl^- con tratti architetturali e funzionali dell'apparato radicale e con caratteristiche che favoriscono interazioni benefiche nella rizosfera (inclusa la simbiosi micorrizica) può contribuire ad aumentare resa e stabilità produttiva in ambienti costieri salinizzati. Strategie analoghe sono attualmente sviluppate per frumento e orzo, così come per colture orticole (ad es. pomodoro) e specie arboree, con obiettivi di resilienza produttiva in scenari di crescente salinità dei suoli e delle acque irrigue. Accanto alla genetica, ha assunto crescente rilevanza l'impiego di pratiche agronomiche e biotecnologiche complementari: uso di ammendanti organici e gessosi per migliorare struttura del suolo e lisciviazione dei sali, gestione dell'irrigazione per evitare picchi di concentrazione nella rizosfera, rotazioni con colture meno sensibili o con piante alofite in grado di estrarre sali, inoculo di microrganismi benefici (batteri promotori della crescita, funghi micorrizici) che migliorano lo stato idrico e nutrizionale delle piante in condizioni saline, zone buffer e aree umide costiere che possono mitigare gli effetti della risalita del cuneo salino.

In prospettiva, la questione cruciale riguarda l'entità dell'incremento di salinità dell'acqua irrigua che può essere considerato sostenibile senza innescare processi di salinizzazione e/o sodicizzazione tali da compromettere, nel medio-lungo periodo, la funzionalità e la fertilità del suolo. Le evidenze disponibili suggeriscono l'opportunità di adottare un approccio cautelativo, fondato su incrementi gradualmente e su un monitoraggio sistematico della conducibilità elettrica (EC) e, ove possibile, degli indici di sodicità (ad es. SAR/ESP). Tale impostazione dovrebbe essere integrata dall'impiego di cultivar tolleranti e da pratiche di gestione dell'acqua e del suolo orientate a prevenire l'accumulo salino e a preservare la qualità strutturale del suolo (permeabilità, infiltrazione, stabilità degli aggregati). In questo quadro, la "resilienza" del sistema suolo-coltura va perseguita privilegiando strategie di

rigenerazione e conservazione delle funzioni del suolo, piuttosto che la sola massimizzazione della resa nel breve periodo.

Box 5. Il caso delle “*Resurrection plants*”

Tra le piante in grado di reagire positivamente quando vengono poste in ambiente ostile si ricordano le “*resurrection plants*”⁷. Lo stress idrico può influenzare le piante in diversa maniera. Un leggero stato di stress comporta delle modeste variazioni sullo stato di idratazione e le piante reagiscono contenendo le perdite d’acqua aumentando l’assorbimento dell’acqua (Bray, 1997). La più severa forma di deficit idrico è la disidratazione totale. Questo estremo limite si manifesta quando la maggior parte dell’acqua protoplasmatica viene perduta e solamente dei piccolissimi quantitativi di acqua strettamente legata rimangono nella cellula. La natura dei metaboliti caratterizza un gruppo di angiosperme, chiamate “piante resurrezione”, fornite di fogliame maturo che può sopportare la siccità per lunghi periodi, mantenendo tuttavia la capacità di riacquistare vigore e turgore completo in breve tempo se reidratate.

⁷*Craterostigma plantagineum* Hochst (Bartels D., Salamini F., 2001)

Resistenza all’anossia da allagamento

Se da un lato i cambiamenti climatici accentuano la siccità, dall’altro stanno aumentando la frequenza e intensità degli eventi piovosi estremi e degli allagamenti, con conseguente rischio di anossia radicale per molte colture. Le piante coltivate sono in genere più “preparate” a sopportare un deficit idrico che un eccesso d’acqua: poche giornate di suolo saturo possono determinare cali di resa molto più elevati di un episodio siccitoso di pari durata, soprattutto in suoli compatti e mal drenati.

A livello fisiologico, l’anossia riduce rapidamente la respirazione mitocondriale e la produzione di ATP, promuove un metabolismo fermentativo meno efficiente, accumulo di etanolo e lattato, e danni da specie reattive dell’ossigeno al momento del ritorno alla normossia. A livello morfo-anatomico, le specie più tolleranti sviluppano aerenchima (tessuti ricchi di spazi d’aria) nelle radici, radici avventizie superficiali, barriere alla perdita di ossigeno radiale e, in alcune specie, capacità di allungamento rapido del fusto per “sfuggire” alla sommersione.

Il caso del riso è paradigmatico: l’introduzione del gene SUB1A ha consentito di selezionare varietà in grado di sopravvivere a periodi di sommersione completa fino a due settimane, limitando la crescita in altezza e preservando le riserve fino al ritiro delle acque. Studi recenti mostrano però come, in scenari di eventi estremi più lunghi e complessi, sia necessario combinare più geni e tratti adattativi (tolleranza all’anossia germinativa, resistenza ai ristagni intermittenti, capacità di recupero rapido). Approcci simili sono allo studio per frumento, mais, colza e specie foraggere, con particolare attenzione ai sistemi colturali delle pianure alluvionali e delle aree costiere.

In ambito europeo l'aumento degli episodi alluvionali e di allagamento delle aree agricole è documentato da più episodi. Il 2024 ha registrato il più ampio coinvolgimento dei sistemi fluviali da oltre un decennio, con vittime, danni economici ingenti e lunghi periodi di saturazione dei suoli agricoli in molte regioni. Questo quadro ha riportato al centro del dibattito la necessità di integrare miglioramento genetico, gestione agronomica (sistemi di drenaggio, lavorazioni che evitino la compattazione e la suola di aratura, rotazioni con specie più tolleranti) e pianificazione territoriale.

La resistenza all'anossia da allagamento va quindi intesa come proprietà emergente del sistema suolo-pianta-paesaggio: varietà più resilienti possono ridurre il rischio produttivo, ma la loro efficacia è massima solo se inserite in contesti dove il suolo è strutturalmente sano, la rete idraulica è mantenuta e l'uso del territorio evita l'urbanizzazione delle aree di naturale espansione delle piene.

Global and climate change

La sfida posta dai cambiamenti globali e climatici si gioca, in larga misura, sulla capacità di adattamento e di mitigazione dei sistemi produttivi. Ciò richiede un aumento del livello di attenzione da parte della comunità scientifica e del mondo agricolo, evitando al contempo approcci allarmistici che rischiano di risultare controproducenti. Diventa quindi indispensabile integrare in modo coerente le attività di ricerca e sviluppo con le altre componenti del settore agricolo, al fine di superare le principali barriere produttive imposte dai fattori ambientali. Con il progredire delle conoscenze scientifiche si è consolidata la consapevolezza dell'esistenza di limiti fisiologici alla produttività delle colture, legati principalmente a temperatura, radiazione solare e disponibilità idrica. Tali limitazioni erano, in realtà, già ben note all'uomo fin dalle prime fasi di domesticazione delle piante, quando risultava evidente come le condizioni ambientali influenzassero in modo determinante l'accrescimento, lo sviluppo e, in ultima analisi, la resa delle colture agrarie. I limiti massimi di produttività sono stati raggiunti solo in condizioni sperimentali, mentre in campo aperto permangono ampi vincoli legati alla variabilità ambientale. Risulta inoltre complesso incrementare in modo significativo la resistenza delle colture alla carenza idrica senza incidere negativamente sulla produttività. Anche strategie basate sul potenziamento dell'apparato radicale, sebbene promettenti dal punto di vista fisiologico, non offrono ancora evidenze consolidate di un beneficio diretto sulle rese finali. Decenni di studi sulla fisiologia vegetale convergono infatti su un punto chiave: la produttività potenziale delle colture è fortemente condizionata dai fattori ambientali e può essere considerata, nella maggior parte dei casi, sostanzialmente raggiunta. Alla luce di queste considerazioni, l'obiettivo prioritario dell'agricoltura non può più essere esclusivamente la massimizzazione delle rese, ma deve includere l'adozione di

sistemi colturali sostenibili sia dal punto di vista ambientale sia economico. Gli agricoltori sono chiamati ad affiancare alla produzione il miglioramento — o quantomeno il rallentamento del degrado — dell’ambiente in cui operano, secondo principi coerenti con i modelli di agricoltura sostenibile e rigenerativa. In una prospettiva più ampia, la risposta alle sfide globali legate ad acqua e cibo richiede anche scelte di carattere sistemico. Come sottolineato da Chiara Tonelli e Umberto Veronesi, due obiettivi risultano centrali: da un lato l’aumento della produzione agricola globale, dall’altro una profonda revisione dei modelli alimentari, con una riduzione significativa del consumo di carne nei Paesi occidentali e la contestuale limitazione dell’adozione di tali modelli nei Paesi emergenti. In questo contesto, la realizzazione di una nuova fase di evoluzione dell’agricoltura — orientata alla rigenerazione delle risorse naturali — non può prescindere dal contributo delle biotecnologie applicate al settore agricolo, che rappresentano uno degli strumenti chiave per conciliare produttività, sostenibilità e adattamento ai cambiamenti climatici.

BIBLIOGRAFIA

- Bartels, D., & Salamini, F. (2001). Desiccation tolerance in the resurrection plant *Craterostigma plantagineum*: A contribution to the study of drought tolerance at the molecular level. *Plant Physiology*, 127, 1346–1353.
- Bray, E. A. (1997). Plant responses to water deficit. *Trends in Plant Science*, 2, 48–54.
- Ghirardelli, A., Straffelini, E., Park, E., D’Agostino, V., Masin, R., & Tarolli, P. (2025). *Environmental Research Letters*, 20, 013005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad9bcd>
- Horn, R., Krümmelbein, J., & Pagliai, M. (2013). Introduction to soil degradation processes under various land use and regional conditions. *Advances in GeoEcology*, 42.
- Hornby, H. E., & Hornby, R. M. (1963–1964). The reaction of *Craterostigma plantagineum* Hochst. to desiccation. *Kirkia*, 4, 217–220. National Herbarium & Botanic Garden.
- Mastrorilli, M., Rana, G., Verdiani, G., Tedeschi, G., Fumai, A., & Russo, G. (2018). Economic evaluation of hydrological ecosystem services in Mediterranean river basins: A case study in Southern Italy. *Water*, 10, 241.
- Mastrorilli, M., & Zucaro, R. (2016). Towards sustainable use of water in rainfed and irrigated cropping systems: Review of some technical and policy issues. *AIMS Agriculture and Food*, 1(3), 294–314.
- Pagliai, M., Vignozzi, N., & Pellegrini, S. (2004). Soil structure and the effect of management practices. *Soil and Tillage Research*, 79, 131–143.
- Pagliai, M., Vignozzi, N., & Pellegrini, S. (2012). Gestione del suolo e agricoltura sostenibile. *Italus Hortus*, 19(3), 29–46.

Schneider, K., Wells, B., Schmelzer, E., Salamini, F., & Bartels, D. (1993). Desiccation leads to the rapid accumulation of both cytosolic and chloroplastic proteins in the resurrection plant *Craterostigma plantagineum* Hochst. *Planta*, 189, 120–131.

Sinclair, T. R. (1994). Limits to crop yield? In K. J. Boote, J. M. Bennett, T. R. Sinclair, & G. M. Paulsen (Eds.), *Physiology and determination of crop yield* (Chap. 19). ASA–CSSA–SSSA.

Tarolli, P., Luo, J., Park, E., Barcaccia, G., & Masin, R. (2024). Soil salinization in agriculture: Mitigation and adaptation strategies combining nature-based solutions and bioengineering. *iScience*, 27, 108830. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2024.108830>

Wang, W., Straffelini, E., & Tarolli, P. (2023). Steep-slope viticulture: The effectiveness of micro-water storage in improving resilience to weather extremes. *Agricultural Water Management*, 286, 108398.

Bibliografia storica e saggistica (essenziale)

Cantù, C. (1838–1846). *Storia universale* (36 voll.). Torino: Giuseppe Pomba e Comp.

Ferrara, V. (2013). *Come cambia il clima e le conseguenze sull'agricoltura*. In **La salvaguardia del territorio in Italia: una priorità per lo sviluppo**, Roma, 6 marzo 2013.

Rinaldo, A. (2009). *Il governo dell'acqua. Ambiente naturale e ambiente costruito*. Venezia: Marsilio Editori.

Tonelli, C., & Veronesi, U. (2010). *Acqua e cibo: la rivoluzione necessaria*. Milano: Sperling & Kupfer (a cura di E. Casadei).

Tumiatti, A. (2005). *Il Taglio di Porto Viro. Aspetti politico-diplomatici e territoriali di un intervento idraulico nel delta del Po (1598–1648)*. Taglio di Po.

Zendrini, B. (1811). *Memorie istoriche dello stato antico e moderno delle lagune di Venezia*. Padova.