

I GEORGOFILI

Quaderni
2013-VI



AGRICOLTURA E USO RAZIONALE DELL'ACQUA

Firenze, 18 giugno 2013



EDIZIONI POLISTAMPA

Con il contributo di



ENTE CASSA DI RISPARMIO DI FIRENZE

Copyright © 2014
Accademia dei Georgofili
Firenze
<http://www.georgofili.it>

Proprietà letteraria riservata

Supplemento a «I Georgofili. Atti della Accademia dei Georgofili»
Anno 2013 - Serie VIII - Vol. 10 (189° dall'inizio)

Direttore responsabile: Paolo Nanni

Edizioni Polistampa
Via Livorno, 8/32 - 50142 Firenze
Tel. 055 737871 (15 linee)
info@polistampa.com - www.polistampa.com
Sede legale: Via Santa Maria, 27/r - 50125 Firenze

ISBN 978-88-596-1398-5

Servizi redazionali, grafica e impaginazione
SOCIETÀ EDITRICE FIORENTINA

INDICE

PIETRO LAUREANO	
<i>Sistemi tradizionali per la produzione, gestione e la salvaguardia dell'acqua</i>	7
ELISA MASI, GIULIA ATZORI	
<i>Concetto di acqua virtuale</i>	39
GIACOMO PIETRAMELLARA, PAOLA ARFAIOLI	
<i>Il sistema biologico del suolo in relazione alla risorsa idrica</i>	45
LUIGIA PAZZAGLI, ANIELLO SCALA	
<i>Il sistema pianta e lo stress idrico</i>	55
SALVATORE MORICCA, BEATRICE GINETTI	
<i>Risorse idriche e salute delle piante</i>	67

PIETRO LAUREANO*

Sistemi tradizionali per la produzione, gestione e la salvaguardia dell'acqua

INTRODUZIONE

Conoscenze tradizionali che avevano per secoli garantito l'assetto ambientale e paesaggistico, equilibrando le alternanze climatiche e le avversità naturali, stagionali o catastrofiche, e garantendo il rinnovo delle risorse, sono oggi perdute a causa di uno sviluppo basato sullo spreco delle risorse naturali, le migrazioni dei popoli e la crescita produttiva illimitata. Fino all'epoca industriale il processo di uso e trasformazione dello spazio è operato attraverso tecniche e conoscenze verificate dall'esperienza collettiva di lungo periodo, trasmesse attraverso le generazioni e incorporate nel complesso culturale delle genti, dove vanno a costituire il sistema del sapere tradizionale. Questa conoscenza perpetua un insieme di buone pratiche che realizzano gli scopi produttivi salvaguardando l'ambiente e assicurandone la continua manutenzione. Ogni tecnica tradizionale, infatti, non è solo un espediente per risolvere un singolo problema, ma è sempre un metodo elaborato, spesso polifunzionale e che fa parte di un approccio integrato tra società, cultura ed economia strettamente legato a una concezione del mondo basata sulla gestione accurata delle risorse locali. Un terrazzamento è allo stesso tempo un modo per proteggere un pendio, ricostituire i suoli, raccogliere l'acqua, creare uno spazio utilizzabile come ricovero per gli animali. Ed è anche qualcosa di più, ha un alto valore estetico e paesaggistico. L'applicazione a grande scala della tecnica dei campi terrazzati diventa un sistema formidabile di edificazione dello spazio, riflesso e concretizzazione fisica della società che lo esprime. La tecnologia si perpetua all'interno dell'organizzazione sociale grazie a un complesso di valori spirituali, simbolici e culturali che la rendono

* *Architetto, consulente UNESCO per gli ecosistemi in pericolo, direttore di IPOGEA*

memorizzabile, condivisibile e creano il consenso agli sforzi collettivi necessari al suo impiego. La società, a sua volta, trova sostegno economico nei benefici prodotti dall'uso della tecnica. Si determinano così relazioni fortemente coese tra tecnica, cultura, forma sociale e assetto del territorio. Le conoscenze tradizionali costituiscono la mediazione culturale e tecnologica attraverso la quale una visione del mondo diventa pratica sociale, gestione dell'ambiente e garanzia alimentare e produttiva. Sono parte integrante di un trama di nessi e di relazioni fortemente integrate rette da una costruzione globale di segni e di significati. Operano grazie a una struttura culturale socialmente condivisa: sono il sistema della scienza e della conoscenza locale storicamente dato (Laureano, 2001).

LE TECNICHE DI RACCOLTA DI ACQUA DEI NOMADI CACCIATORI RACCOGLITORI

Le prime forme di pratiche e tecniche e usate nella modificazione deliberata dello spazio per ottenerne un vantaggio sono dovute alle necessità alimentari e di riparo. Soprattutto l'approvvigionamento di acqua, fondamentale per la vita, ha comportato lo sviluppo di conoscenze relative alla gestione dei suoli. Nel deserto varie specie di mammiferi scavano buche per facilitare la raccolta spontanea di acqua e animali come i castori costruiscono dighe per il controllo idrico. Non deve meravigliare quindi che già i primi ominidi realizzarono superfici e argini di raccolta di acqua. La più antica struttura di questo tipo sinora individuata potrebbe essere quella rinvenuta nel sito di Isernia dove in località La Pineta è stata scavata una paleosuperficie risalente dai 700.000 ai 500.000 anni fa costituita da un aggregato di ciottoli di travertino, resti ossei e manufatti in calcare formati un primordiale lastricato (Peretto, 1991). Più certe sono le tecniche impiegate nel Paleolitico da gruppi nomadi di Cacciatori Raccoglitori appartenenti alla nostra specie *Sapiens*. Questi potevano realizzare la loro mobilità grazie alla conoscenza approfondita del territorio e in particolare dei metodi di rinvenimento e di approvvigionamento d'acqua. L'umanità paleolitica raccolse l'acqua bevibile nelle caverne dove si verificava lo stillicidio e la percolazione naturale e realizzò lastricati di pietre per raccogliere le piogge e indirizzarle in pozze. Usò sbarramenti, fossati e allineamenti di pietre per agevolare la vegetazione spontanea e la pratica della pesca (Drower, 1954). Nelle steppe, le savane e i deserti lungo gli altopiani carsici o le pianure interfluviali i gruppi umani sfruttavano aree favorevoli ai margini di zone soggette ad alternanze di impaludamento e di siccità tramite tecniche di regolazione dei flussi. Queste evolvono in imponenti sistemi di trappole funzionali alla pesca come quelle rinvenute in località Mount William in Australia (Lourandos, 1980) e in Nuova Guinea dove da 9.000 a 6.000 anni fa



Foto 1 *Le Cinque Terre, Italia. Sistema dei campi terrazzati*

furono sviluppati complessi sistema di canali di drenaggio (Diamond, 1997). Questo sapere, frutto di esperienze verificate nel lungo periodo, è consolidato attraverso il successo dei detentori, memorizzato tramite il pensiero simbolico e l'arte, trasmesso nei racconti attraverso le generazioni. Esso, a partire dai più arcaici luoghi di origine in Africa, si diffonde nel mondo intero parallelamente all'espansione dei gruppi umani. Spirali, meandri e labirinti sono riprodotti nei simbolici graffiti rupestri e possiamo riconoscere le stesse forme nelle trappole e nei recinti dove sono svolte le prime esperienze di addomesticamento. La raccolta di acqua è associata all'origine della spiritualità e dell'arte come attestano le rappresentazioni nelle caverne e il rinvenimento a El Guettar in Tunisia di un tumulo artificiale di pietre risalente a 150.000 anni fa, contenente selci e manufatti paleolitici, dalle evidenti funzioni simboliche collegate a pratiche idriche (Gruet, 1955). Fenomeni di sedentarizzazione senza agricoltura sono provati già dal tardo paleolitico. A Göbekli Tepe in Anatolia scavi recenti hanno dimostrato l'esistenza d'imponenti strutture di culto edificate da gruppi pre agricoli 12.000 anni fa (Schmit, 2007). La quantità di persone, per costruire le strutture, richiede grande disponibilità di acqua potabile. Significativamente la stessa area è quella dove in seguito si realizzerà la prima domesticazione e produzione di grano dalla mutazione spontanea di una specie selvatica locale. A Gerico dai 12.000 ai 10.000 anni fa sono realizzate strutture di sostegno dei suoli formate da muri



Foto 2 *Santo Stefano Belbo, Italia. Terrazzamenti*

di contenimento e piattaforme di argilla con ambienti impermeabilizzati per l'acqua bevibile (Çauvin, 1994). Le recenti acquisizioni antropologiche non vedono più il Paleolitico come una fase meno avanzata della conoscenza messo da parte dall'evoluzione, è invece visto come un livello avanzato e raffinato precursore d'importanti acquisizioni nelle seguenti aree: l'arte, la sedentarizzazione, la conoscenza ambientale, il simbolismo, l'organizzazione comunitaria e la gestione della flora e della fauna. Il sistema di conoscenza dei Cacciatori Raccoglitori è un modo di pensare trogloditico, con un basso dispendio di risorse, labirintico, nomadico, passivo e lento che può offrire ancora oggi indicazioni per un uso attento e sostenibile dell'ambiente. Esso persiste come un substrato comune a tutti i popoli che muta, si evolve o si perde secondo le condizioni geografiche e sociali. E, a volte, riemerge spiegando così le analogie che spesso si riscontrano nei miti, le tecniche e le forme tra genti e luoghi lontani.

LA GESTIONE IDRICA NELLE PRIME SOCIETÀ

A partire dall'VIII millennio in Africa, Medioriente, Anatolia e nell'area pakistano – indiana si sviluppano i modi originari di coltivazione in zone aride

dove l'elevata insolazione permetteva rendimenti che giustificavano l'impegno necessario (Childe, 1954). Proprio in queste aree, data la mancanza di pioggia, si dovettero sviluppare metodi di gestione dell'acqua. Prima dell'introduzione delle tecniche irrigue si utilizzarono acque naturalmente e direttamente disponibili che in condizioni di aridità, sono presenti come umidità atmosferica e nei sedimenti del terreno. L'umidità che si deposita sul suolo, ha avuto un ruolo fondamentale nella nascita delle coltivazioni organizzate in piccoli orti realizzati nei luoghi dove il fenomeno si realizzava in modo più importante: aree situate vicino a bacini, corsi d'acqua o situazioni geologiche e ammassi di pietre che favorivano l'apporto di vapore acqueo e la condensazione della rugiada. L'osservazione del migliore ciclo vegetativo delle piante spontanee permetteva l'individuazione delle zone più adatte. Allo stesso modo si poteva determinare dove sfruttare l'acqua contenuta nei sedimenti del terreno. I suoli alluvionali, il loess, i corsi asciutti degli wadi sono i più adatti a conservare riserve idriche negli strati superiori e diventano le aree di sviluppo delle prime società neolitiche che passano da forme di "coltivazione nomade", basata sullo spargimento dei semi nelle zone favorevoli in cui si ritornava solo per il raccolto, a pratiche di organizzazione dello spazio.

Fossati e canali per la raccolta e il riuso dell'acqua nel neolitico

Tecniche di filtro per l'acqua e canalizzazioni per fertilizzare i campi sono state realizzate in Siria e Palestina dalle prime società neolitiche e si sono diffuse a oriente e occidente di questa area con il moltiplicarsi dei centri di produzione agricola e la sedentarizzazione. Con il passare del tempo questi metodi divengono sempre più elaborati. Nel VI e V millennio, prima dello sviluppo delle pratiche per controllare il corso dei grandi fiumi e nelle aree dove questi non erano presenti, i cosiddetti villaggi trincerati sono circondati da fossati che drenano l'acqua e la rendono utilizzabile per l'alimentazione e l'irrigazione. Nel villaggio trincerato di Murgia Timone a Matera nel sud d'Italia vi sono cisterne di raccolta collegate tra loro per costituire un sistema di filtro e di potabilizzazione dell'acqua piovana (Laureano, 1993). Fossati ellittici che circondano il villaggio si trovano anche in Germania, nel sito di Kol Lindenthal lungo la valle del Reno e in Cina nel sito di Banpo lungo il Fiume Giallo. Il villaggio localizzato vicino Xi'an risalente al 4.500 a.C. ha fossati interrotti da muri di pietra filtranti per lo stoccaggio e la depurazione idrica.

Nelle caverne, dove avviene lo stillicidio spontaneo dell'acqua, si scava per seguire e meglio intercettare i flussi. Oppure si ingrandiscono e approfondono

discono inghiottitoi naturali dotandoli di aperture sulla parete del pendio e di cisterne di drenaggio e di raccolta. Sono le pratiche che evolveranno nelle tecniche ipogee dei tunnel di captazione e di architettura passiva che, in situazioni geomorfologiche adatte, avranno gli esiti degli insediamenti trogloditi e delle città di pietra (Laureano 1993). L'attività estrattiva nelle miniere di selce crea le prime corti a pozzo fornite di gallerie radiali. Il modello riscontrabile nelle Grimes Caves in Inghilterra e nelle miniere del Gargano nel sud Italia (Di Lernia, 1990) si riproduce in dispositivi per la raccolta dell'acqua e nei sistemi abitativi formati da ipogei a corte centrale. Gli ambienti di sviluppo di queste tecniche sono le zone carsiche secche e gli altipiani calcarei come le Murge pugliesi, ma anche le pianure semi aride argillose del Nordafrica e le distese di loess in Cina. In aree che beneficiano di piogge, in pianure scarsamente drenate o nelle zone carsiche e ai bordi di altipiani elevati privi di corsi di acqua si realizzano insediamenti stabili dalla pianta ellittica o semi circolare marcata da più perimetri di fossati. Questi, in condizioni di alternanza climatica, rispondono a molteplici funzioni legate all'equilibrio idrico: drenano le acque nei momenti di pioggia e le conservano per le stagioni secche; fungono da abbeveratoi e da fosse per la raccolta dei liquami e dei rifiuti utili per la concimazione e fertilizzazione dei suoli; marciano simbolicamente i luoghi e rafforzano la coesione sociale, l'identità del gruppo e la propensione alla sedentarizzazione. I fossati sono dunque strutture polivalenti evoluzione delle semplici pozze adoperate per l'acqua e per i rifiuti. La pratica si rivelò utile alla selezione delle specie coltivate domestiche e alla individuazione dei periodi della semina adatti a ogni pianta. Infatti i semi ingeriti finivano con gli escrementi nelle fosse dove germinavano spontaneamente nella stagione a essi appropriata. La bagnatura dei campi con l'acqua delle pozze ha portato anche alla comprensione delle facoltà fertilizzanti del letame.

Tecniche di organizzazione idrica a larga scala nelle società idrauliche

Nelle aree favorite dalla presenza di grandi fiumi lo sviluppo di sistemi elaborati di canalizzazione ha portato alla creazione delle prime città. Nelle pianure e i bacini interfluviali dell'Irak e della Mesopotamia si diffondono nel VI millennio e le prime tecniche di canalizzazioni e di argini di diversione dei flussi che attuano l'irrigazione per inondazione. Nello stesso periodo nel Belucistan (Iran e Pakistan) la civiltà che precede quella di Harappa impiega dighe interrato chiamate *gabarband* per trattenere i flussi idrici nel suolo e dighe ad accumulo di sabbia che favoriscono la sedimentazione del limo e il controllo



Foto 3 *Yemen, terrazzamenti*



Foto 4 Vallese, Svizzera. Tecniche di irrigazione di pendii aridi mediante canalette (bisse) che portano acqua dai ghiacciai

dei depositi alluvionali e le piene. Sulla matrice dei canali si sviluppano le strutture insediative a trama ortogonale. Le prime costruzioni non circolari sono realizzate con acqua e terra cruda, il limo stesso delle coltivazioni, come negli insediamenti di Çatal Hüyük, in Anatolia nella piana di Konia, e di Jarmo, ai piedi dei monti Zagros in Irak, che preludono a organizzazioni urbane. La forma quadrata permette soluzioni diversificate e complesse con una

maggiore potenzialità di evoluzione. Le abitazioni possono estendersi e aggregarsi progressivamente tra loro senza spazi residuali. Nelle pianure interfluviali grandi agglomerati prosperano parallelamente allo sviluppo nel territorio delle tecniche di sostegno dei terreni con cortine murarie continue, costruzione di piattaforme, argini e canali. Queste pratiche permetteranno nelle valli alluvionali come l'Indo, il Nilo, la Mesopotamia, il Fiume Giallo tecniche a grande scala di gestione dell'acqua sviluppate da grandi organizzazioni statali chiamate per questo motivo società idrauliche (Wittfogel, 1957). Nel III millennio queste società sviluppano i primi sistemi urbani forniti da acquedotti, fognature e acqua per usi sanitari lungo il corso dei grandi fiumi: il Nilo in Egitto, il Tigri e l'Eufrate in Mesopotamia, il Karun in Iran, l'Oxus (Amu Darya) e l'Axartes (Syr Darya) in Asia centrale, l'Indo nel sub continente indiano e il Fiume Giallo (Yang Ho) in Cina. Le città di Harappa e Mohenjodaro appartenenti alla civiltà dell'Indo avevano abitazioni fornite di acqua e impianti sanitari. Sistemi di approvvigionamento idrico sono utilizzati nelle case insieme a tecniche per lo smaltimento delle acque reflue e di irrigazione. Pratiche paragonabili a quelle che sarebbero state utilizzate a Cartagine e Roma più di 2.000 anni dopo. A Harappa si deve la prima introduzione dei pozzi dotati di una struttura in pietra che permette una maggiore profondità nel raggiungere le acque sotterranee. In Iran, vicino alla Ziggurat di Tchoga Zanbil risalente al 1,275-1,240 AC, la civiltà Elamita, le cui opere per regolare il corso del fiume Karun sono ancora visibili nella città di Shushtar, è stato realizzato un sistema di filtraggio dell'acqua unico costruito di mattoni cotti (Abdollahi, 2007). Le civiltà idrauliche egizia e sumera svilupparono la grande architettura monumentale a partire dall'esperienza derivata dalla costruzione di argini e canali necessari per l'irrigazione e la concimazione delle terre. In Egitto le prime piramidi erano di fango, come diretta evoluzione delle tecniche costruttive neolitiche di argini e delle piattaforme di fango riscontrabili in Africa, in Mesopotamia e in Mesoamerica. Il terreno risultato degli scavi ha formato i primi tumuli sacri. Nelle civiltà idrauliche i sovrani hanno dato un'interpretazione monumentale delle tecniche. La costruzione di imponenti monumenti ha favorito l'urbanizzazione, l'identità sociale e la prosecuzione delle attività di lavoro durante la sosta delle attività nelle opere idrauliche. Il potente controllo statale delle società idrauliche richiede queste grandi opere che glorificavano e giustificavano il dispotismo e la grande burocrazia amministrativa. In Mesopotamia la mancanza dei vantaggi dell'inondazione periodica, come invece avveniva in Egitto, causa la perdita tendenziale della fertilità dei terreni e, insieme all'uso dei mattoni cotti, con la derivante necessità di legno, porta al crollo di queste società. In paesaggi più frammentati privi della

disponibilità idrica dei grandi fiumi si perpetuano, invece, tecniche tradizionali di captazione e gestione idrica gestite da comunità a piccola scala aventi un più armonioso rapporto con l'ambiente.

IDROGENESI IN ASSENZA DI FIUMI

Con l'età dei metalli popoli organizzati in clan familiari dotati di grande mobilità dovuta all'uso del carro e del cavallo diffondono tecniche che permettono nuove aree di coltivazione. Strutturando percorsi nei crinali e le comunicazioni attraverso il mare e i deserti gruppi agro-pastorali e transumanti, grandi nomadi carovanieri, commercianti, cercatori di metallo e coltivatori sfruttarono quelle zone che non erano stati precedentemente colonizzate per la mancanza di corsi d'acqua perenne e diffusero tecniche che permisero l'utilizzo di nuove aree coltivabili. In situazioni impervie si realizzano i terrazzamenti, nelle grandi capitali dei bacini interfluviali giardini pensili. A partire dal IV millennio si sviluppa la tecnica dello scavo di cisterne e prese d'acqua per irrigare i campi da insediamenti posti su colline elevate sfruttando la forza di gravità. Nell'Eta del Bronzo la civiltà Edomita, poi Nabatea, diffusa dalla sua capitale Petra in Giordania nel Negev e in tutto il deserto arabico realizza metodi di sterilizzazione dell'acqua costituiti da strati di pietra, sabbia e carbone vegetale. Un'evoluzione sistematica della gestione di acqua nell'antica Grecia comincia a Creta durante la prima età del bronzo, cioè il primo periodo minoico (ca. 3500-2150 a.C.). Nella civiltà minoica sono stati progettati e costruiti estesi sistemi e strutture per l'approvvigionamento idrico, l'irrigazione e il drenaggio per la popolazione e l'agricoltura (Angelakis e Spyridakis, 1996).

Negli ambienti accidentati del Medioriente, delle isole e penisole mediterranee e in promontori costieri di zone aride si diffondono insediamenti posti su sommità collinari fortificate. Città, cittadelle e acropoli devono resistere agli assedi e assicurarsi l'acqua bevibile. Nei siti dell'Eta del Bronzo di Arad (Amiran 1962), Jawa e Megiddo, nel nord del deserto arabico (Barrois, 1937), e di Qana, nel sud dello Yemen sulla costa dell'Oceano Indiano (Laureano, 1995), l'area all'interno delle mura funge da superficie di raccolta per alimentare vasche e cisterne a cielo aperto o scavate in profondità raggiungibili con tunnel e scalinate. Condotte irrigano i campi coltivati o l'eventuale espansione urbana ai piedi della collina o anche, in caso di agglomerati costieri, riforniscono le installazioni portuali per la fornitura d'acqua alle navi come ad Aden nello Yemen. Nel corso di assedi i canali sono tagliati e i difensori,

asserragliati sulla sommità, continuano a produrre la risorsa idrica negata agli assalitori. Ogni roccia o massa muraria ha una funzione di produzione idrica e di protezione dei suoli. La differente inerzia termica con l'atmosfera crea superfici più fredde che determinano la condensazione. Le pareti intercettano i venti e l'umidità. Gli interstizi fra i blocchi e la porosità della pietra trattengono l'acqua. L'ombra la protegge dall'evaporazione. I massi impediscono lo smantellamento dei suoli e facilitano la formazione di humus. In questo modo contribuiscono alla produzione di acqua la grande parte delle strutture di pietra a secco diffuse nelle terre aride della Puglia dove gli accumuli di massi spugnosi assorbono la brina notturna e riforniscono di umidità il terreno (Nebbia, 1961, Cantelli, 1994). È significativo che nei più imponenti di queste mura, i *parietati*, i filari di pietra che chiudono superiormente i due paramenti della muratura sono disposti con le lastre inclinate verso l'interno per permettere lo scorrimento della brina nella pietraia interna di riempimento. I muri a secco mantengono le qualità idromorfe del terreno e agiscono da termoregolatori ed equilibratori di umidità sia in situazioni aride che in condizioni di freddo intenso dove permettono l'esistenza di acqua nel suolo nella forma liquida, utilizzabile dalle piante, impedendo la formazione di ghiaccio. Questo spiega l'esistenza di strutture di muri a secco, cerchi e allineamenti di pietra, generalmente utilizzati come captatori di umidità, anche in zone soggette a piogge abbondanti come l'Irlanda e le isole Orcadi. Qui la funzione di termoregolazione contrasta la glaciazione dei suoli e la formazione del permafrost. In questo periodo si diffondono le strutture megalitiche circolari e a falsa volta coniche che costituiscono la fusione della capanna africana con le tecniche di costruzione muraria dei pozzi e delle cisterne. Da queste forme originano la tholos micenea, i trulli pugliesi, i talayotes delle Baleari e innumerevoli strutture rurali, composte di masse murarie, spalti di raccolta e cisterne sotterranee, che assumono aspetti sempre più massicci come i nuraghi massima evoluzione delle possibilità di aggregazione sul territorio della forma rotonda e dell'uso del megalitismo per la condensazione della umidità.

Nelle zone aride si sviluppano una serie di tecniche che dai semplici allineamenti di pietra, tumuli a mezza luna, muri a secco evolvono in complessi dispositivi di doppie cortine murarie provviste di cisterne di raccolta. Ne permangono innumerevoli tracce archeologiche nel deserto del Negev, lungo il wadi Araba e nella valle del Giordano tutte aree ora completamente deserte, ma che, grazie a questi metodi di captazione dell'umidità e di protezione dei suoli, erano fertili e prosperose. Prospezioni archeologiche (Evenari, 1971) hanno dimostrato come nel Negev antichissimi resti di olivi e vigne fossero irrigati grazie a un sistema di muretti a secco collettori di rugiada chiamati in arabo *teylelat*



Foto 5 Puglia, Italia. Captazione di umidità tramite muri di pietra calcarea

al 'anab, monticoli per la vigna. Le piante erano installate all'interno di piccoli recinti le cui pietre, disposte con larghi interstizi, captavano il vento carico di umidità. La vigna e l'olivo potevano così crescere in mancanza assoluta di sorgenti e falde. I muri, i cumuli di pietra, i tumuli, i trulli e gli ammassi di roccia calcarea chiamati specchie, i talayotes, i nuraghi, i telayet el anab agiscono quindi da strutture di condensazione e conservazione dell'acqua. Gli ammassi di pietre assolvono la loro funzione sia di giorno che di notte. Sotto il sole cocente il vento con tracce di umidità si infiltra tra gli interstizi del cumulo di pietre le quali hanno una temperatura inferiore nella parte interna perché non esposta al sole o è rinfrescata dalla camera ipogea sottostante quando questa è presente. L'abbassamento di temperatura provoca la condensazione di gocce che sono assorbite dal terreno nel caso dei muri o precipitano nella cavità. La stessa acqua accumulata fornisce altra umidità e frescura amplificando l'efficacia della struttura di condensazione. Durante la notte il processo s'inverte e la condensazione avviene esternamente ma produce risultati analoghi. La superficie fredda delle pietre condensa l'umidità e la brina scivola negli interstizi umidificando il suolo o andandosi a raccogliere nella camera della cisterna. Numerose strutture di questo tipo sono usualmente considerate monumenti funerari, ma sono invece rapportabili a usi idrici a scopo funzionale o rituale.

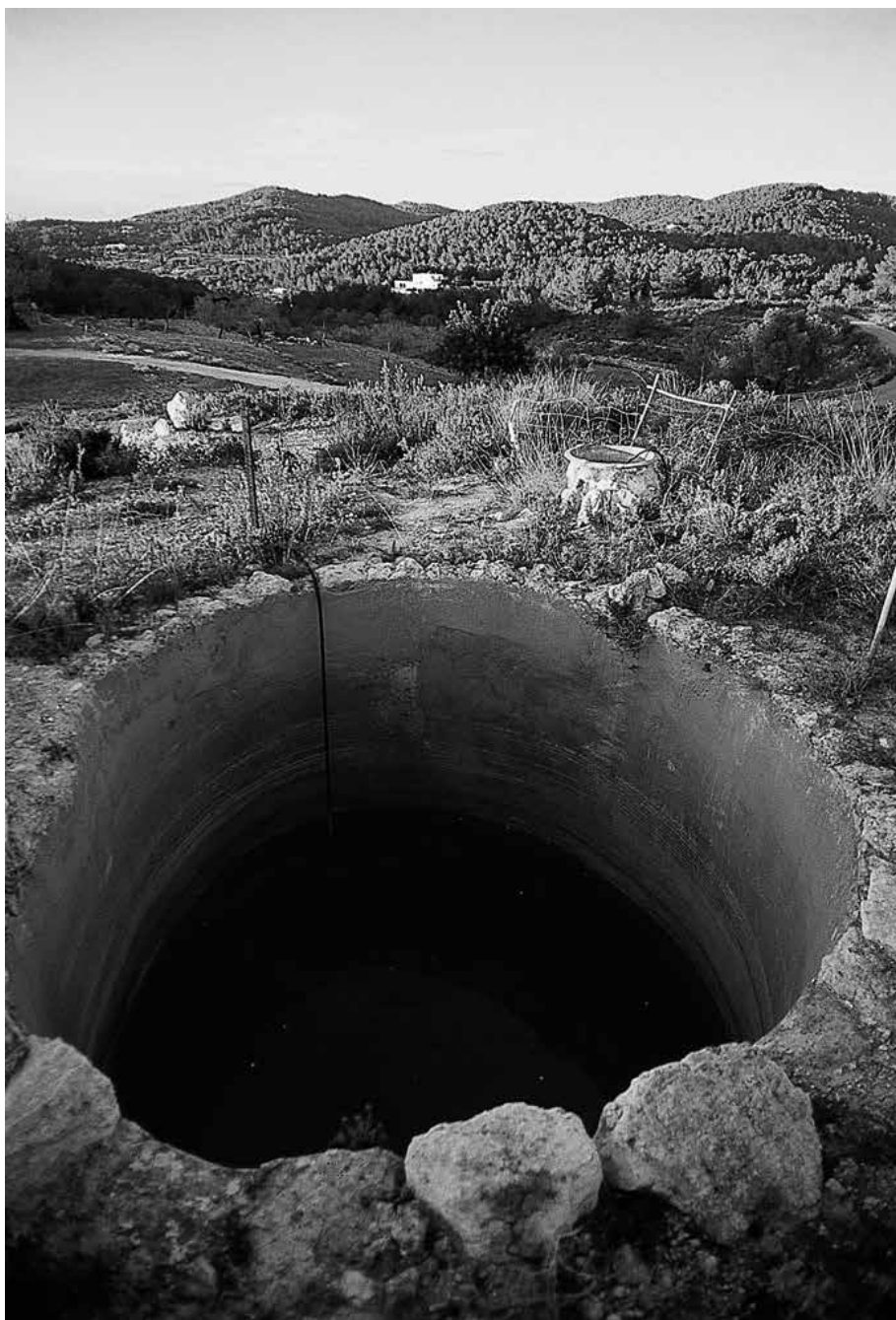


Foto 6 Ibiza, Spagna. Cisterne e giare per la raccolta di acqua piovana



Foto 7 Thula, Yemen. Grandi cisterne per la raccolta di acqua piovana



Foto 8 *Biet Bows, Yemen*

Dispositivi simili si riscontrano nel neolitico sahariano, nel deserto arabico e nello Yemen, regione quest'ultima considerata area di sviluppo di civiltà delle acque nascoste basate sulla idrogenasi aerea (Pirenne, 1977), e sono successivamente diffusi in tutto il Mediterraneo. Trovano nella città di Petra la più imponente realizzazione urbana e sono per questo designati con il nome di agricoltura edomita e nabatea dai due antichi popoli che avevano come centro questa città (Zaydine, 1991). I contatti con il sud dell'Arabia tramite la via dell'incenso spiegano le similarità con le tecniche idriche sabeche hanno nella cosiddetta diga di Marib, in realtà un sistema di ripartitori e di chiuse d'acqua (Dentzer, 1989), la più imponente manifestazione dell'evoluzione in strutture complesse delle pratiche di formazione di suolo per inondazione. Nei luoghi più elevati dove le precipitazioni sono presenti, anche se in modo sporadico, a questi dispositivi sono associate le superfici di raccolta delle acque di pioggia che evolvono in architetture a terrazza o a corte organizzate a questo scopo. Sono proprio i templi e i monumenti culturali, come successivamente le moschee e i chiostri, a svolgere la funzione di captazione dell'acqua tanto che nel corso del tempo diventerà sempre più difficile risalire all'identificazione funzionale delle opere. Come per i tumuli, i kurgan, la tholos si attua un processo di utilizzazione da parte delle costruzioni sacre delle forme



Foto 9 Petra, Giordania. Sistema di raccolta dell'acqua e protezione delle coltivazioni in corti scavate nella roccia

delle strutture idriche. Questo sia per l'uso concreto dell'acqua nelle cerimonie religiose e funerarie, sia perché la sapienza idrica era spesso veicolata dalle personalità sacre o eroiche, sia per il solo scopo simbolico di richiamare nel mausoleo funebre le architetture delle strutture produttrici di acqua, fonte di vita. Nelle società a piccola scala i clan familiari, attraverso i mausolei e i riti collegati, celebrano gli antenati rafforzando l'identità di gruppo e marcando i punti strategici di percorrenza.

ACQUE E MONDO SOTTERRANEO NELLA CONCEZIONE MINOICA ED ETRUSCA

Nelle antiche società le elaborazioni tecnologiche e le loro applicazioni e diffusione hanno uno stretto rapporto con la concezione del mondo e il pensiero spirituale. Il legame è ancora più rilevante a proposito delle tecniche idriche che, a causa della loro importanza, acquistano connotazioni simboliche rispetto alla vita e al suo contrario a essa indissolubilmente legato: la morte e il mondo ultraterreno. La comparazione tra i sistemi idrici minoici ed etruschi permette un raffronto tra queste due civiltà in cui alle analogie tra le tecniche materiali corrispondono le problematiche sociali, produttive e ambientali e la cosmo visione complessiva (Angelakis et al., 2013). Entrambe le società,

quella Minoica e Quella Etrusca, hanno una stretta connessione con la ricerca e lo scavo dei metalli in rapporto alla Età del Bronzo, la prima, e alla Età del Ferro, la seconda. Per questo motivo hanno dovuto confrontarsi con due ordini di problematiche simili: a) la capacità di scavo e la realizzazione di opere sotterranee dovute alle pratiche minerarie; b) la necessità di stanziarsi in zone obbligate, determinate dalla presenza dei metalli o da ragioni difensive, e quindi sfavorite naturalmente di risorse e in particolare di acqua. Le due problematiche hanno soluzioni tecnologiche comuni per il controllo del ciclo idrico e il mondo ipogeo la cui applicazione è in rapporto con elaborate cosmogonie e rituali. Sino dalla più alta antichità la tematica del labirinto costituisce la sintesi più nota ed efficace della civiltà minoica. In essa la componente mitica e simbolica ha una base materiale nelle complesse strutture legate alla raccolta delle acque di pioggia e di conservazione in ambienti sotterranei. Creta e le isole greche dai suoli accidentati, rocciosi e privi di acque libere hanno imposto alla civiltà minoica la realizzazione di sistemi di drenaggio di superficie, la captazione nelle grotte naturali e in cavità artificiali e lo stoccaggio accurato in cisterne e sotterranei. Queste pratiche sono parte di una concezione spirituale in cui il mondo sotterraneo e i processi idrici che dalle viscere della terra ascendono nell'alto dei cieli per ricadere in basso sono una metafora dei destini umani. Allo stesso modo drenaggi, meandri e labirinti fanno parte del patrimonio di simboli e di pratiche idriche del centro e sud Italia tra la preistoria e l'Età Romana, quadro storico e geografico della civiltà Etrusca. Nell'alto Lazio e nella area di Tuscania nel I millennio i suoli furono drenati per renderli adatti all'agricoltura con fossati, tunnel e dighe di sbarramento e diversione dello stesso tipo delle opere idriche realizzate in Beozia nel II millennio per rendere la terra coltivabile e controllare il livello del lago Copaide. Le città etrusche fortificate come Orvieto, Orte e Volterra avevano scale intagliate nella roccia, cisterne e cunicoli simili alle cittadelle micenee. La tecnica dei tunnel di captazione sotterranea, chiamati in Iran *qanat*, fu probabilmente importata in Italia dall'oriente nell'VIII secolo proprio dagli Etruschi attraverso la Lidia loro terra di origine. Opere rupestri, fenditure nella roccia – le cosiddette tagliate etrusche – e meandri sotterranei utilizzati a uso votivo hanno anche una funzionalità idrica. La comune necessità del controllo del ciclo dell'acqua dalle risorse eterree dei cieli alle pratiche ipogee caratterizza la civiltà Minoica a Etrusca e ne spiega le analogie. Queste si riscontrano nell'architettura con la corrispondenza tra la struttura della tholos e le tombe etrusche, nelle pratiche religiose con la divinazione e la geomantica e negli stessi costumi sociali e sessuali. I Romani denunciavano la licenziosità delle donne etrusche le quali partecipavano a banchetti e libagioni

che nell'ambiente latino erano riservati ai soli uomini. In queste attitudini riecheggia il ruolo della donna preposta al ciclo dell'acqua, della fecondità e della vita. La Regina del Labirinto di Cnosso con i suoi riti di fertilità, la Signora dei Serpenti e le fanciulle dedite ai giochi del toro rappresentate con i seni nudi negli affreschi di Thera nell'isola di Santorino, le Dee e le Ninfe protettrici degli antri, le sorgenti e le fontane spodestate dalle catastrofi che distrussero il mondo minoico si perpetuano così nel mistero, nel ruolo e nei riti d'acqua delle donne etrusche.

EVOLUZIONE DEI SISTEMI IDRICI NELLE COMUNITÀ A PICCOLA SCALA E NELLE SOCIETÀ IDRAULICHE

Durante il primo millennio società idrauliche hanno sviluppato irrigazione su larga scala per collegare i bacini interfluviali e per contrastare la diminuzione della fertilità dei suoli. Allo stesso tempo, nelle zone meno favorite, ai margini dei grandi imperi, piccola comunità perpetuano le conoscenze legate alla idrogenesi e il riutilizzo delle acque sviluppando un insieme complesso di tecnologie per rendere vivibili le aree senza acqua apparente. Si trasmettono così conoscenze adattate in società che, per contrapposizione a quelle idrauliche, definiamo comunità, idrogenetiche e autopoietiche. Queste forme sociali sopravvivono grazie all'isolamento e l'asprezza geografica in luoghi volutamente scelti per queste caratteristiche e trasformati da ingegnose comunità in centri di particolare rilievo economico tramite il commercio o la coltivazione di una specie rara, o per effetto di forti motivazioni culturali legate alla fede religiosa e alla coesione sociale.

La divaricazione tra le comunità a piccola scala e la società idraulica è evidenziata, materialmente e simbolicamente, dalla costruzione del Canale Imperiale Cinese iniziata alla metà del I millennio AC. La storia della Cina è caratterizzata dal corso dei due grandi fiumi che strutturano la sua geografia. L'antica civiltà cinese fiorì nelle dure condizioni del bacino del Fiume Giallo (Huang He) che, situato alla fine della via della seta, era stato veicolo di diffusione delle conoscenze tradizionali idriche per centinaia di anni. Il secondo grande fiume, il fiume Azzurro (Yang Tse) fluisce in condizioni geografiche ampie e favorevoli che hanno permesso la grande produzione e l'industria. Il Canale Imperiale fu costruito per collegare il corso del Fiume Giallo del deserto a quello del Fiume Azzurro della modernità e caratterizza l'unificazione dell'impero cinese.

Sviluppato approssimativamente lungo una direzione nord-sud per circa 1700 km è il sistema di canali più esteso del mondo e per l'imponenza geo-

grafica e l'impatto sulla società può essere considerato un vero e proprio Nilo artificiale. La sua realizzazione struttura lo spazio cinese e ne accompagna le trasformazioni, territoriali, sociali e amministrative. Come la Grande Muralgia la sua realizzazione promuove la creazione territoriale, sociale e amministrativa della Cina. In alternativa a queste opere, che uniscono ampi sistemi territoriali in un grande impero, piccole comunità in situazioni geografiche più difficili perpetuano soluzioni locali che creano autonomia e indipendenza. Questo è il modo in cui la tecnologia oasi, il più importante esperimento del genere umano di sopravvivenza in zone aride del pianeta, è stato elaborato. È grazie alle oasi, estese attraverso i deserti, da Marrakesh a Xi'an che la rete di comunicazione intercontinentale tra l'Africa, l'Europa e l'Asia è stata creata (Laureano, 2012a).

LA CONOSCENZA DELLE ACQUE NASCOSTE: OASI E TUNNEL DI CAPTAZIONE

Nell'antico Egitto il termine oasi compare già alla fine all'Antico Regno su iscrizioni della VI dinastia (2350-2200 a.C.) (Giddy, 1987). In esse è indicata una Regione delle Oasi incorporata al Regno Egizio tramite un percorso che attraverso le oasi permette i collegamenti verso Ovest e Sud. Gli antichi Egizi distinguono nettamente le aree del deserto occidentale che comprendono l'insieme delle oasi di Baharya, Dakhla, Farafra, Kharga e Siwa, indicate con il termine oasi, dalla Valle del Nilo. Quest'ultima infatti, pur essendo basata su sistemi di irrigazione e gestione delle coltivazioni, beneficia di un apporto idrico abbondante garantito da una grande apporto fluviale. Considerano quindi oasi solo quelle situazioni caratterizzate da risorse idriche apparentemente inesistenti o scarse. Infatti le oasi sono formate da comunità locali a piccola scala in possesso di sapienze ambientali specifiche a luoghi resi abitabili tramite tecniche che richiedono sforzi considerevoli per la realizzazione e il mantenimento.

L'oasi costituisce un sistema autocatalitico in cui un iniziale apporto di condensazione e di umidità viene amplificato dalla installazione delle palme da dattero (*phoenix datcylifera*) nei deserti caldi e del pioppo (*populos nigra*) nei deserti freddi che producono ombra e attirano organismi formando humus. Il palmeto determina un microclima umido alimentato attraverso tecniche di captazioni idriche come le gallerie drenanti delle foggara, le precipitazioni occulte, la condensazione, il controllo dei flussi sotterranei e delle piene. L'abitato realizzato in terra cruda non comporta lo spreco di legname per la cottura dei mattoni, è raffrescato dal percorso sotterraneo dell'acqua



Foto 10 *Oasi di Taghit, Algeria*



Foto 11 *Scavo di una depressione protetta da foglie di palma per la raccolta di umidità e creazione del palmento. Sahara, Algeria*

e fornisce rifiuti per la fertilizzazione dei campi. Il sistema gestisce la risorsa acqua secondo un ciclo di utilizzo che non solo è compatibile con la rinnova-



Foto 12 *Il maestro dell'acqua con la piastra per la misurazione delle quote. Sahara, Algeria*

bilità delle quantità disponibili, ma le aumenta. Nel deserto la domesticazione della palma da dattero, *Phoenix dactylifera*, è il presupposto dell'impianto delle oasi. Dai principali poli neolitici i palmeti si estendono attraverso i deserti con lo sviluppo di conoscenze capaci di determinare l'effetto oasi: la creazione di cicli autopoietici, di produzione idrica e di gestione delle risorse (Laureano, 1988). Le tecniche si diffondono anche nel Mediterraneo settentrionale e ai margini meridionali del deserto in luoghi dove la palma da dattero non giunge a maturazione. In queste situazioni altre piante sono utilizzate in associazione con l'orticoltura per garantire il mantenimento dei suoli e l'ombra come l'ulivo nel Mediterraneo e la Papaia nel Sahel e l'Arabia del Sud. Si determina un modello allargato di oasi come capacità di creare situazioni vivibili in ambienti difficili e ostili grazie all'impiego delle conoscenze idro agricole. Aree irrigue sono create utilizzando situazioni geomorfologiche favorevoli in condizioni geografiche precise: bacini isolati in mezzo al deserto; grandi pianure tra picchi montani; nastri di oasi lungo reti idrografiche; crocevia di strade lontane, internazionali o intercontinentali. Piccoli sistemi di habitat, la cui trama urbana è spiegabile a partire dalla matrice idro agricola e dalle necessità di captazione dell'acqua, divengono centri di rilevanza regionale e con caratteristiche urbane. Costituiscono realtà variegate riscontrabili in situazioni disperate: città-oasi di terra cruda, come quelle sahariane



Foto 13 *Pietra di ripartizione per la gestione delle quote d'acqua. Timimoun, Algeria*

o dello Yemen, utilizzano i rifiuti organici degli abitanti per fertilizzare le sterili sabbie e renderle adatte alla realizzazione di ardite architetture; oasi di pietra, scavate fino dalla preistoria nel sud d'Italia e in Medioriente sono capaci di condensare nelle grotte e sulle costruzioni a secco l'acqua necessaria; oasi religiose, scolpite nelle valli d'erosione della Cappadocia, della Palestina,



Foto 14 *Drenaggi e preparazione del terreno per la creazione di humus. Shibam, Yemen*

della Tebaide e dell'Etiopia o installate lungo la via della seta fino in Cina, si organizzano come eremi e giardini murati irrigati tramite gallerie drenanti, cisterne e canalizzazioni; oasi di mare, diffuse nelle aride isole del Mediterraneo e del Mar rosso, vengono alimentate da sorgenti aeree; e anche oasi di foresta pluviale poiché le stesse architetture Maya, pure sviluppatesi in un clima umido possono essere interpretate attraverso la funzionalità di raccolta dell'acqua indispensabile in un ambiente carsico privo di corsi superficiali.

All'impianto e diffusione delle oasi contribuiscono l'incontro di conoscenze e tecniche specialistiche e l'esistenza di un forte motivazione. L'oasi non nasce in modo completamente originale, ma associa elementi e competenze diversificate già esistenti utilizzandole in modo nuovo (Cleuziou e Laureano, 1998). È frutto della unione delle conoscenze ambientali dei nomadi cacciatori raccoglitori e allevatori, con le tecniche degli agricoltori e, spesso, dei pescatori. A queste si aggiunge il ruolo del patriarca, condottiero, capo politico o religioso, o del mercante. Queste figure, spesso riunite in una sola persona, sono i propugnatori del progetto oasi, stimolano e canalizzano le spinte e gli obiettivi che motivano l'insediamento in luoghi determinati. A partire dal III millennio a.C., popolazioni nomadi, rimaste ai margini dei grandi processi di creazione urbana che hanno caratterizzato il periodo compiono una scelta agro pastorale

e sotto la spinta di motivazioni e pressioni tramite l'interazione, l'alleanza, la simbiosi o l'assimilazione di altri gruppi danno luogo alla messa in comune del pacchetto di conoscenze specifiche determinando un salto di complessità e realizzando l'oasi come sistema completo di vivibilità e produzione. Questi gruppi tramite le oasi hanno garantito la permanenza e le necessità di sussistenza in aree estreme di potenzialità mineraria divenute strategiche nel Calcolitico e nell'età del Ferro. È in questo contesto che si sviluppa la tecnica dei tunnel di captazione fondamentali nella diffusione delle oasi. Che queste tecniche non siano il risultato di un'imposizione da un potere centrale, ma l'espressione del sapere delle popolazioni locali, è dimostrato dalla loro estrema varietà e adattabilità ambientale, e dalla denominazione diversa utilizzato in diverse regioni: *qanat*, *kareez*, *falaj*, *foggara*, *khettara*, ecc. I tunnel di captazione sono costituiti dalla galleria sotterranea quasi parallela al suolo e dai pozzi verticali. La galleria sotterranea ha una leggera pendenza utile per fare scorrere l'acqua assorbita e incanalarla all'aria aperta per gravità. Il tunnel non s'immerge nella falda acquifera ne drena la parte superiore tramite le sue pareti filtranti, in questo modo attraversa la parte del terreno dove gli scambi tra acque profonde e la saturazione di acque di superficie sono maggiori. Scambi continui avvengono tra l'aria sopra e sotto la terra e una conseguenza di questa pratica è la condensazione di acqua nel suolo quando la sua temperatura è sufficientemente bassa. È proprio in questi scambi e interazioni che le gallerie drenanti intervengono. I condotti verticali e le pareti del tunnel filtranti assorbono l'umidità e producono acqua. Tra i due estremi: raccolta l'acqua da una sorgente o dal suolo o produzione di acqua sfruttando contributi atmosferici (umidità, precipitazioni occulte, fonti aeree), si colloca l'intera gamma dei tunnel di captazione. Il modo di funzionamento dipende dalle condizioni ambientali e topografiche nonché le stagioni, le alterazioni delle condizioni climatiche e cicli climatici a lungo termine. Le gallerie di captazione, punto di arrivo di diverse esperienze sviluppate in aree diverse e adattate alle situazioni geografiche locali, operano in maniera diversificata nei diversi ecosistemi per attingere acqua nascosta e produrre acqua libera (Laureano 2012b).

USO INNOVATIVO DEI SISTEMI TRADIZIONALI DI CONOSCENZE IDRICHE

Agricoltura

In agricoltura tecniche tradizionali che risalgono alla preistoria vengono oggi riproposte come pratiche ottimali per la rigenerazione dei suoli, il risparmio

idrico, la lotta al dissesto idrogeologico e alla desertificazione. La tecnica dei fossati drenanti diffusa nella Daunia, in Puglia, a partire da 6.000 anni fa, è stata realizzata dalle popolazioni neolitiche in oltre 3.000 villaggi, circondati da trincee a forma di mezzaluna. Oggi la pratica tradizionale è stata sostituita dall'agricoltura meccanizzata e in questi luoghi si verificano tremende alluvioni in inverno e periodi di estrema siccità d'estate. Sugli altipiani etiopi, lungo i bordi della Rift Valley molti villaggi usano ancora sistemi di fossati polifunzionali per immagazzinare e regolamentare le risorse idriche, per raccogliere liquami e produrre fertilizzante.

La *condensazione dell'acqua atmosferica* nelle caverne o tramite cumuli di pietre e muretti di pietra calcarea a secco è utilizzata in tutte le società antiche e nelle zone aride. Oggi nei deserti sono sperimentati veri e propri *pozzi aerei*, *condensatori atmosferici*, *turbine a vento* che producono acqua dall'umidità atmosferica seguendo gli spessi principi e risorse di antichissime tecniche.

La pratica di installare presso le piante *giare cisterna* piene di acqua o massi calcarei per fornire irrigazione è oggi riproposta con tecniche innovative che permettono di superare in modo più efficace la stessa moderna irrigazione a goccia a goccia. Queste tecniche vengono utilizzate nei processi di rimboschimento delle zone aride e permettono di dotare ogni singolo arbusto di una provvista d'acqua sufficiente nelle fasi di crescita fino a quanto la pianta non ha raggiunto un forza vegetativa autonoma. Nel quadro di questa famiglia di tecniche una grande impresa ha elaborato un composto enzimatico degradabile chiamato *acqua secca* che installato vicino le radici si trasforma progressivamente nell'apporto idrico necessario.

I *tunnel di captazione*, sono ancora utilizzati oltre che nel Sahara, in China e in Iran. Fornendo solo la quantità d'acqua che l'ambiente può rinnovare costituiscono una soluzione riproponibile, anche in paesi più umidi in alternativa allo scavo dei pozzi che attingono direttamente dalle falde esaurendole e causando problemi di inquinamento profondo e di risalita della salinità. Nel Sahara si sta sperimentando l'uso di tecniche per alleviare i duri lavori di scavo introducendo piccoli macchinari appositamente progettati. Di questa classe innovativa fa parte tutto un insieme di *attrezzature meccaniche adattate* che vanno dai mini trattori per lo scavo di lunette per la raccolta dell'acqua a nuovi macchinari per l'agricoltura sostenibile. In questo campo la riproposizione di pratiche antiche permette importanti successi nella lotta all'erosione e al degrado dei suoli. In Italia si vanno sperimentando con successo pratiche come l'*inerbamento* e la *semina su duro*. La prima consiste nel lasciare crescere l'erba sotto i frutteti e gli oliveti realizzando un manto protettivo e evitando le arature causa di erosione. La seconda consiste nel seminare il grano sul

terreno non arato pratica che preserva i suoli, comporta un risparmio di costi e permette risultati migliori di quelli realizzati con l'aratura. La pratica risulta ottimale nelle situazioni di siccità perché le spighe crescono meno alte e necessitano di meno acqua e fertilizzanti chimici.

Insedimenti urbani e architettura

Tutta una serie di tecniche innovative desunte dalla tradizione si vanno sperimentando in ambito urbano. Sulla trama agricola dei terrazzamenti e dei sistemi idrici si è realizzata la gran parte dei centri antichi. Questi nella loro struttura inglobano e perpetuano le tecniche di raccolta di acqua piovana, le aree a orti protetti, l'uso dei rifiuti organici per la creazione di humus, i metodi di architettura passiva e di controllo climatico per la conservazione degli alimenti e per il risparmio dell'energia, le pratiche di riciclo dei residui produttivi e alimentari. In questa categorie rientrano tutte le tecniche innovative nel campo del *fotovoltaico*, del *riscaldamento solare*, della *captazione idrica*, del *compostaggio* e *riciclo dei rifiuti*. Sono ormai numerose le aziende che propongono il *tetto giardino* diventato legge nelle nuove abitazioni in situazioni avanzate come Tokio dove i manti vegetali sulle terrazze degli edifici moderni, reminiscenza dei giardini pensili di Babilonia, mantengono una situazione climatica ottimale nelle abitazioni, raccolgono l'acqua e costituiscano spazi di svago e contemplazione.

Nel campo del riciclaggio dei rifiuti un ampio settore innovativo è quello delle micro soluzioni di quartiere o anche di abitazione. Numerose sono le esperienze di realizzazione dei *mini composter* collocabili nei giardini o in aree comune di quartiere capace di assorbire i rifiuti organici e fornire direttamente l'humus per i giardini. È stato anche realizzato un *water composter* basato su un dispositivo collocabile al disotto della tazza da toilette che trasforma direttamente gli scarichi in compost. Esistono *mini reattori di biomassa* che trasformano i rifiuti in gas da cucina e anche impianti più grandi per il riscaldamento dell'intera abitazione.

Per le acque reflue vi sono soluzioni sia a piccola che a grande scala. In Germania abitazioni moderne sono state dotate della *palude verticale* un dispositivo che imita i processi di decantazione e filtraggio delle acque realizzati in natura sui suoli paludosi. Il processo è riprodotto lungo la parete dell'edificio in intercape-dini di vetro dove per gravità percolano, si filtrano, si fitodepurano e si riciclano continuamente le acque reflue. A Calcutta una tecnica tradizionale innovativa impiegata a grandissima scala ha risolto l'immenso problema delle acque usate di

questa città. Nella tradizione i residui idrici erano riutilizzati nelle risaie, oggi con innovazioni appropriate di *filtraggio e sterilizzazione delle acque reflue* gli scarichi di Calcutta da problema sono diventati una risorsa per irrigare e fertilizzare i campi di riso. Un ulteriore settore innovativo è costituito dalla vastissima gamma di *prodotti, materiali* e sapere fare necessario nella *architettura* di qualità. In questo campo sono ormai numerose le esperienze di imprese che ripropongono su mercato materiali e processi desunti dalla tradizione come la calce, gli intonaci naturali, le pozzolane sia per il restauro sia per le nuove realizzazioni.

Produzione di qualità e salvaguardia del paesaggio

Nel Vallese è ancora in uso il sistema di prese d'acqua dalle sorgenti dei ruscelli e dai ghiacciai che, tramite canalette superficiali, *le bisse*, permettono di irrigare per gravità pendii montani più elevati rispetto ai corsi naturali dei torrenti. Una tecnica simili è oggi riproposta nel Tibet con metodi innovativi per *preservare i ghiacciai* in pericolo a causa del riscaldamento climatico. Nella Loira la tecnica tradizionale delle *abitazioni troglodite* e delle scavo di cave sotterranee è mantenuta per preservare ogni metro di terreno in superficie prezioso per la produzione di vini di qualità e per organizzare cantine dal perfetto microclima per la lavorazione di quel prodotto. In Toscana la produzione vinicola fornisce gli apporti economici necessari per preservare uno dei più splendidi paesaggi agrari consolidati e stabilizzati nei secoli da trasformazioni distruttive.

In Liguria dove nella regione delle Cinque Terre esiste uno dei più estesi sistemi di *pendio terrazzato* del Mediterraneo la pratica tradizionale che protegge i suoli e capta e canalizza le acque si è perpetuata attraverso una meccanizzazione agricola innovativa. La difficoltà del lavoro sui terrazzamenti è dovuta ai faticosi sistemi di trasporto effettuabili solo a piedi. Nella tradizione esistevano tecniche di risalita tramite slitte tirate in alto con corde. Già all'inizio del secolo sono state sostituite con cremagliere su binari meccanici. La stessa tecnica è oggi riproposta con sistemi appropriati di *monorotaia* che permettono di ascendere il pendio senza disturbare il paesaggio e l'ecosistema.

Pratiche sociali

Le forme associative legate all'acqua sono presenti in tutte le società. Nella agricoltura nabatea e andalusa lungo il percorso delle canalizzazioni si creavano forme di cooperazione e aiuto sociale come le *alcherias* ancora esistenti in

Spagna. Nel Botswana il *motswelo* è una forma tradizionale di cooperativa e di banca che raggruppa in genere quindici o venti individui. I partecipanti si aggregano in modo volontario e apportano al gruppo ciascuno quello che può. C'è chi contribuisce con una somma di denaro, chi con i prodotti della terra e chi con delle quote di lavoro. Con questo sistema antico si creano forme di risparmio, di prestito senza interessi e di finanziamento di importanti attività. Si può realizzare, per esempio, la produzione e la vendita della birra tradizionale, organizzare la sistemazione idrica dei terreni o dei villaggi. Il lavoro di produzione o di commercializzazione è considerato come deposito di fondi. Tutti i profitti sono destinati a turno a uno dei membri del *motswelo* che li utilizza per finanziare una sua attività o altre esigenze sociali come le feste, il matrimonio, l'acquisto di una casa etc. Queste pratiche sono oggi riprodotte dall'esperienza delle *Banche Etiche* e dei microprestiti che costituiscono un recupero innovativo di consuetudini sociali tradizionali.

In Burkina Fasso lo *zai* è una tecnica tradizionale particolare che permette di rigenerare dei suoli molto degradati. Vengono fatti dei buchi sul terreno che nella stagione umida si riempiono di acqua e in quella secca vengono usati per gettare rifiuti e letame. La pratica attira le termiti che digeriscono i rifiuti. Questi divengono meglio assimilabili dalle radici delle piante mentre il lavoro delle termiti aumenta la porosità dei suoli. Nei buchi si procede poi alla semina ottenendo altissimi rendimenti di raccolto. Pratiche innovative che promuovono originali forme di *simbiosi tra umanità, animali o microrganismi* vengono oggi riproposte per il restauro di suoli degradati o elaborati per la vivibilità di aree estreme.

Nelle isole Baleari le *feixes* sono un tipo tradizionale di organizzazione agricola dove l'irrigazione delle piante è attuata dal sottosuolo fornendo l'umidità necessaria direttamente alle radici senza nessuno spreco di acqua. I campi coltivati sono separati da drenaggi superficiali in cui scorre l'acqua. Da questi si dirama una trama di canali, che passano sotto le coltivazioni, realizzati con materiali calcarei porosi e coperti da un letto di alghe. I canali così realizzati rilasciano al terreno coltivato l'acqua secondo le precise necessità stagionali e climatiche. La tecnica è riproposta nelle *coltivazioni idroponiche* e nella progettazione delle stazioni spaziali.

CONCLUSIONI

È sbagliato considerare le conoscenze tradizionali marginali rispetto ai grandi processi economici e tecnologici in corso. Anche da un punto di vista quantitativo il loro impiego sostiene ancora la maggior parte della popolazione

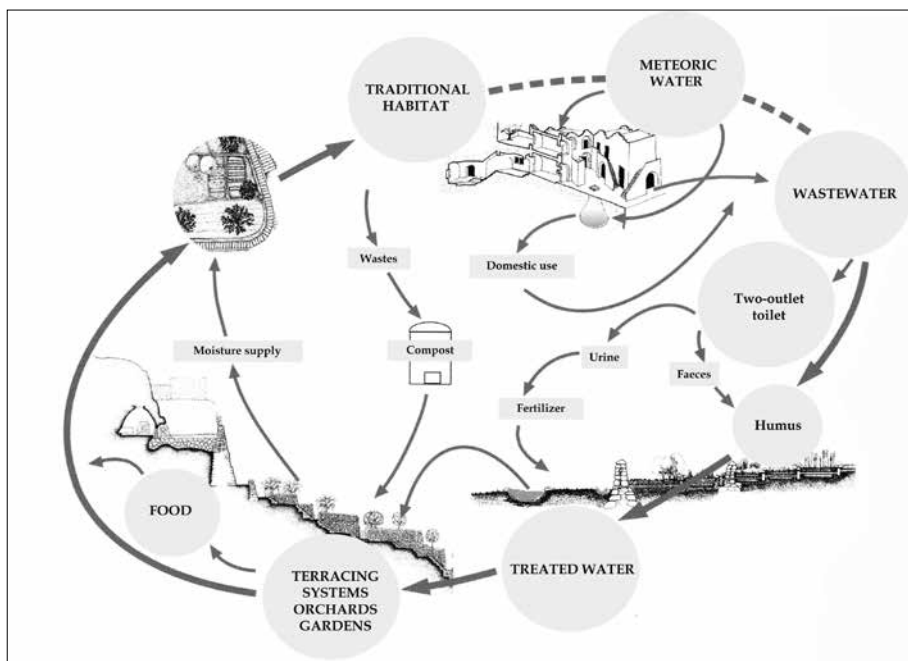


Foto 15 *Diagramma per la riproposizione innovativa del ciclo tradizionale di uso e riuso dell'acqua*

umana presente proprio nei paesi meno industrializzati. Paradossalmente, in questi luoghi dove le tecniche tradizionali sono ancora utilizzate in modo massiccio, il modernismo li considera come un fenomeno di arretratezza invece proprio nei paesi avanzati il loro uso crea immagine e fornisce valore aggiunto. Nelle regioni del Vallese in Svizzera, nella Valle della Loira in Francia e in Toscana, in Italia, il mantenimento di tecniche tradizionali in agricoltura ha assicurato l'alto valore dei paesaggi e la qualità dei prodotti che possono essere ottenuti con queste tecniche. Sistemi di conoscenza tradizionali, mostrano come società arcaiche hanno sviluppato un'economia solida e sono sopravvissute grazie a una gestione geniale delle risorse naturali. Queste esperienze sono oggi fondamentali per ripensare completamente il sistema tradizionale di gestione delle acque. Non solo a causa delle crescenti esigenze di acqua potabile, ma anche per lo spreco e la distruzione delle risorse che i metodi attuali comportano. Tra questi è sufficiente considerare che lo scarico di acque reflue in mare provoca la perdita tendenziale di nutrienti sulla terra e l'ipertrofia e la distruzione dell'ecosistema marino. Le acque utilizzate non sono un rifiuto da scaricare, ma una risorsa che sottoposta a un continuo

riutilizzo e riciclo, può fornire acqua potabile, fertilizzanti ed energia. Una disciplina recente, la biomimetica, crea materiali innovativi copiando le piante del deserto e gli organismi marini. Nuovi tessuti asettici sono inventati dallo studio di proprietà dei gusci dei granchi. Generazioni innovative di nano materiali come il grafene, che attraverso la microfiltrazione permetterà di potabilizzare qualsiasi acqua, sono creati osservando le membrane di organismi naturali. Allo stesso modo, osservando e studiando le conoscenze tradizionali è possibile elaborare una ecomimetica, una ingegneria naturalistica e blu: l'arte di imparare dal grande patrimonio di esperienza accumulata dall'uomo nella costruzione di paesaggi.

RIASSUNTO

Le Conoscenze Tradizionali per la raccolta e distribuzione dell'acqua, la protezione dei suoli, il riciclaggio e l'uso ottimale della energia costituiscono un immenso serbatoio di diversità biologica e culturale e di conoscenza sostenibile. Questo testo si propone di fornire una panoramica generale sulle tecniche tradizionali di gestione delle acque e considerate come parte della storia culturale. È esaminata l'evoluzione delle pratiche, dal Paleolitico alle società agricole che hanno sviluppato l'irrigazione e geniali tecniche di riutilizzo delle acque, in diverse parti del mondo. Particolare attenzione è data alle pratiche di gestione dell'acqua sviluppate nelle zone aspre e aride e in particolare alle società a piccola scala come le oasi. Lo studio delle conoscenze tradizionali è svolto come contributo a un nuovo paradigma di gestione delle risorse idriche e a una ingegneria blu più in linea con l'approccio dello sviluppo sostenibile per promuovere l'integrazione degli aspetti tecnici, etici ed estetici. Sono descritti esempi di uso innovativo delle pratiche tradizionali per scopi di sviluppo agricolo, architettonico e urbano.

ABSTRACT

Traditional Knowledge for water harvesting and distribution, soil protection, recycling and optimal energy use constitute a huge reservoir of biological and cultural diversity and of sustainable knowledge. This paper aims to provide a general overview on the water management traditional techniques and local knowledge considered as part of cultural history. The evolution of these practices from the Palaeolithic era and the agrarian societies having developed ingenious irrigation and water reuse techniques in different parts of the world, is examined. Special attention is given to water management practices developed in the harsh and arid areas and notably to the small scale societies such as the oases. The study of traditional knowledge is described as a contribution to a new water management paradigm and a blue engineering more in line with the sustainable development approach to promote integration of technical, ethical and aesthetical aspects. Several examples of innovative use of water traditional practices for agricultural, architectural and urban development purposes are described.

BIBLIOGRAFIA

- ABDOLLAHI K. (2006): *Ancient Hydro-structures for water management in Chogha Zanbil, Shushtar and Dezful, Iran*, in *Water and Wastewater*, pp. 239-245.
- ANGELAKIS A.N., DE FEO G., LAUREANO P., ZOUROU A. (2013): *Minoan and Etruscan Hydro Technologies*, in «Water», 5, pp. 972-987.
- ANGELAKIS A. N. AND SPYRIDAKIS S.V. (1996): *Wastewater Management in Minoan Times*, in *Proc. of the Meeting on Protection and Restoration of Environment. Chania, Greece*, August 28-30, pp. 549-558.
- AMIRAN R. (1970): *The beginnings of urbanization in Canaan*, in AA.VV., *Near Eastern Archaeology in XXth Century*, New York.
- BARROIS A.G. (1937): *Les Installations Hydrauliques de Megiddo*, extrait de la *Revue Syria*, n. 3, Librairie Orientaliste Paul Geuthner, Paris.
- CANTELLI C. (1994): *Misconosciute funzioni dei muretti a secco*, in *Umanesimo della pietra*, n. 9, Martina Franca.
- CLEUZIOW S., LAUREANO P. (1998): *Oases and other form of Agricultural Intensification*, in *Papers from the EAA Third Annual Meeting at Ravenna 1997*, volume I: Pre-and Proto-history, M-Pearce and M. Tosi (eds), BAR International series 717, Archaeopress, UK.
- ÇAUVIN J. (1994): *Naissance des divinités Naissance de l'agriculture*, CNRS, Paris.
- CHILDE V. GORDON (1954): *Prime forme di società*, in *A History of Technology*, Clarendon Press, Oxford, V. I, ed. it. *Storia della tecnologia 1. La preistoria e gli antichi imperi*, Bollati Boringhieri, Torino, 1992.
- DE FEO G., LAUREANO P., DRUSIANI R., ANGELAKIS A.N. (2012): *Water and Wastewater Management Technologies through the Centuries, Global Trends & Challenges in Water Science, Research and Management*, IWA, London, pp. 90-94.
- DENTZER M. ET AL. (1989): *Contribution Francaise à l'archéologie Jordannien*, Ifapo Amman.
- DI LERNIA S. E AL. (1990): *Gargano prehistoric mines project: the state of research in the neolithic mine of Defensola-Vieste (Italy)*, in *Origini*, XV.
- DIAMOND J. (1998): *Guns, Germs, and Steel, The Fates of Human Societies*, W.W. Norton & Company, New York-London.
- DROWER M.S. (1954): *Fornitura di acqua, irrigazione e agricoltura*, in *A History of Technology*, Clarendon Press, Oxford, V. I, ed. it. *Storia della tecnologia 1. La preistoria e gli antichi imperi*, Bollati Boringhieri, Torino, 1961¹ 1992.
- EL FAÏZ M. (2005): *Les maîtres de l'eau. Histoire de l'hydraulique arabe*, Actes Sud, Arles.
- EVENARI M., SHANAN L., TADMOR N. (1971): *The Negev the Challenge of a Desert*, Harvard University Press, Cambridge Mass. e London.
- GIDDY L. (1987): *Egyptian Oases*, Ares&Phillips, London.
- GRUET M. (1952): *Amocellement pyramidal de spheres calcaires dans une source fossile moustérienne à El Guettar (Sud tunisien)*, in *Actes du II congrès panafricain de Préhistoire et de Protohistoire*, Alger.
- LAUREANO P. (1988): *Sahara, giardino sconosciuto*, Giunti, Firenze.
- LAUREANO P. (1993): *Giardini di Pietra, i Sassi di Matera e la civiltà mediterranea*, Bollati Boringhieri, Torino.
- LAUREANO P. (1995): *La Piramide Rovesciata, il modello dell'oasi per il pianeta Terra*, Bollati Boringhieri, Torino.
- LAUREANO P. (2001): *Atlante d'acqua, conoscenze tradizionali per la lotta alla desertificazione*, Bollati Boringhieri, Torino.

- LAUREANO P. (2012a): *Traditional Water Technology in Dry Land*, in *Afro-Eurasian Inner Dry Land Civilizations*, Vol. 1, pp. 11-26.
- LAUREANO P. (2012b): *Water catchment tunnels: qanat, foggara, falaj. An ecosystem vision*, in *proceeding IWA Specialized Conference on Waste&wastewater Technologies in Ancient Civilations, Istanbul*.
- LOURANDOS H. (1980): *Change or stability?: Hydraulics, hunter-gatherers and population in temperate Australia* in *World Archeology*, vol. II, n. 3, February.
- MAYS L. W. (2010): *Ancient Water Technologies*, Springer, London-New York.
- NEBBIA G. (1961): *Il problema dell'acqua nelle zone aride: l'estrazione dell'acqua dall'atmosfera*, in «Annali della Facoltà di Economia e Commercio», nuova serie, XVII, Bari.
- PERETTO C. (1991): *Isernia La Pineta. Nuovi contributi scientifici*, Firenze.
- PIRENNE J. (1977): *La Maitrise de l'Eau En Arabie du sud Antique*, Geuthner, Paris.
- TINÈ S. (1983): *Passo di corvo e la civiltà neolitica del Tavoliere*, Genova.
- SEMSAR YAZDI S.A., LABBAF KHANEIKI M. (2010): *Veins of Desert – A review on the technique of qanat/falaj/karez*, UNESCO, Yazd, Iran.
- SCHIMT K. (2007): *Sie bauten die ersten Temple*, München.
- TINÈ S. (1967): *Alcuni dati circa il sistema di raccolta idrica nei villaggi neolitici del foggiano*, in *Atti della XI e XII Riunione scientifica dell'Istituto Italiano di Preistoria e di Protostoria*, Firenze.
- WITTFOGEL K.A. (1957): *Oriental Dispotism*, Yale University Press.
- ZAYDINE F. (1991) : *La royaume des Nabatèens*, in «Le Dossiers d'Archéologie», n. 163.

Concetto di acqua virtuale

Il concetto di acqua virtuale – introdotto nel 1993 dal professor Allan del King's College London – definisce l'acqua necessaria a produrre i cibi, i beni e i servizi che consumiamo quotidianamente (Allan, 1993).

A partire da questo concetto, Arjen Hoekstra – direttore del Water Footprint Network – sviluppa nel 2003 il concetto di impronta idrica: si tratta di un indicatore del consumo d'acqua, applicabile a singoli individui, comunità o aziende, che misura appunto il volume d'acqua necessario a produrre i cibi, beni e servizi consumati da singoli individui, comunità o aziende (Hoekstra et al., 2011).

Fornendo qualche esempio, per produrre un chilo di grano sono necessari circa 1830 litri d'acqua, per un chilo di riso circa 2500 litri (Mekonnen e Hoekstra, 2011) e per un chilo di carne di manzo circa 15400 (Mekonnen e Hoekstra, 2012).

Calcolando la quantità d'acqua necessaria per la produzione dei beni è inoltre possibile quantificare l'acqua che viene scambiata tra diversi Paesi, anche se invisibilmente, insieme alle importazioni e alle esportazioni dei beni stessi.

È interessante notare come la terra è ricoperta per tre quarti della sua superficie da acqua, ma di questa solo una piccolissima parte è costituita da acqua dolce e una parte ancora minore di quest'ultima risulta disponibile, in termini di accessibilità e di costi. Quindi, dal momento che l'acqua riveste un ruolo centrale sia in natura che per ogni attività umana, risulta particolarmente importante studiare una possibile diminuzione della sua disponibilità a

* *Dipartimento di Scienze delle Produzioni Agroalimentari e dell'Ambiente (DISPAA), Università di Firenze*

fronte dei cambiamenti climatici e dell'aumento demografico a livello globale, tanto più perché è la produzione di cibo a richiedere il maggior quantitativo d'acqua: è infatti l'agricoltura il settore in assoluto più esigente in termini di risorse idriche (WWAP, 2012), andando a legare ancora più strettamente disponibilità d'acqua e sicurezza alimentare.

Per comprendere meglio quali sono le tipologie d'acqua che intervengono nella produzione dei beni agroalimentari introduciamo le definizioni di "acqua blu", "acqua verde" e "acqua grigia".

Si definisce acqua blu l'acqua di superficie, cioè contenuta in fiumi e laghi, o proveniente dal sottosuolo. È facilmente accessibile e trasportabile in quanto può essere prelevata, contenuta, misurata, distribuita e conservata (Antonelli e Greco, 2013). Secondo stime della FAO, il 70% di quest'acqua è destinato a livello mondiale all'irrigazione (AQUASTAT 2013).

All'interno dell'acqua blu possiamo distinguere due sotto-categorie: l'acqua proveniente da fonti rinnovabili e quella proveniente da fonti non rinnovabili. Al primo gruppo appartengono l'acqua di superficie o proveniente da falde sotterranee che vengono ricaricate attraverso le precipitazioni o lo scioglimento delle nevi; al secondo gruppo appartiene invece l'acqua estratta da falde acquifere fossili, caratterizzate da una percentuale di ricarica minima (Antonelli e Greco, 2013).

Con acqua verde si intende invece l'acqua piovana o nevosa che non arriva a diventare blu in quanto evapora o viene traspirata dalle colture. Non è prelevabile né trasportabile in quanto intrinseca al sistema pioggia-suolo-pianta (Antonelli e Greco, 2013). Pur se non visibile, la componente verde costituisce la più ampia maggioranza dell'acqua utilizzata in agricoltura (Fader et al., 2011) e il suo utilizzo, come approfondiremo meglio in seguito, ha un impatto molto più leggero sugli equilibri ambientali rispetto all'uso di acqua blu (Aldaya et al., 2010).

Infine, l'acqua grigia rappresenta l'acqua che sarebbe necessaria a diluire eventuali fertilizzanti o pesticidi nel corso della crescita della coltura in produzione fino a concentrazioni ritenute non più dannose per l'ambiente (Hoekstra et al., 2011); tale componente è quindi strettamente dipendente dalla quantità e dalla qualità di input forniti durante il processo produttivo.

Il contenuto di acqua virtuale di un prodotto agroalimentare, generalmente espresso in litri o metri cubi, è quindi dato dalla somma delle sue componenti verde (l'acqua evapotraspirata dalla coltura di riferimento durante tutto il ciclo produttivo), blu (acqua fornita attraverso l'irrigazione) e grigia (acqua utilizzata per diluire fertilizzanti e pesticidi).

Dobbiamo tuttavia precisare che la "sostenibilità idrica" delle produzioni agroalimentari non è ricondotta esclusivamente al quantitativo di acqua vir-

tuale contenuta nel prodotto; è in realtà la tipologia di acqua utilizzata in fase di produzione a rivestire il ruolo più importante.

Come accennato precedentemente, ai beni provenienti da agricoltura non irrigua – cioè caratterizzati da un'impronta idrica verde molto alta – è associato un impatto ambientale molto minore rispetto ai beni ottenuti da agricoltura irrigua (Aldaya et al., 2010). Questo perché la componente verde è necessariamente impiegata nel settore agricolo (o di conservazione dell'ambiente) e non può, per sua natura, avere usi alternativi; diversamente, la componente blu, essendo accessibile e trasportabile, può trovare applicazione anche al di fuori del settore agricolo (Antonelli e Greco, 2013).

Provando a spiegare questo concetto con un esempio possiamo dire che, per quanto siano necessari circa 1000 litri d'acqua per produrre un litro di latte (Mekonnen e Hoekstra, 2012), il latte prodotto da bestiame allevato al pascolo (coltura non irrigua) ha un impatto idrico molto minore rispetto a quello prodotto da bestiame alimentato con foraggio ottenuto da colture irrigue.

Possiamo concludere introducendo una considerazione importante: tutte le pratiche agronomiche volte alla gestione delle acque – dalle sistemazioni idraulico-agrarie e i sistemi irrigui alla selezione di specie caratterizzate da una maggiore water use efficiency; dalla lotta all'erosione idrica alle lavorazioni che migliorano la permeabilità e la struttura del suolo; dalle pratiche di conservazione dell'acqua nel suolo alla possibilità di riciclare acque di scarto o desalinizzare acque marine – rivestono tutt'oggi un'importanza fondamentale. Inoltre, le conseguenze dei cambiamenti climatici sulla risorsa acqua si traducono sempre più in situazioni di siccità in determinate aree del mondo (ad esempio nel Mediterraneo) contrapposte a considerevoli aumenti della piovosità in altre (ad esempio nel Sud-Est Asiatico): rendere il suolo maggiormente capace di catturare l'acqua che gli viene resa disponibile, sia questa poca oppure troppa, e renderla utilizzabile da parte della coltura in produzione è sempre stata un'attenzione fondamentale nel lavoro degli agricoltori di tutto il mondo e mantiene tutta la sua importanza ancora oggi e in futuro.

L'approfondimento dei concetti di acqua virtuale e di impronta idrica, svelando quella parte di acqua invisibile ma determinante nascosta dentro ai beni, costituisce un valido strumento per l'analisi della sostenibilità delle produzioni agroalimentari e per provare a comprendere l'effetto dei cambiamenti climatici sulla risorsa idrica. Introduce inoltre gli elementi necessari per provare a valutare gli scambi di acqua virtuale – “nascosti” nelle esportazioni e importazioni dei beni agroalimentari – a livello globale, che saranno tanto più benefici quando le esportazioni vanno in direzione di paesi più poveri

d'acqua rispetto ai paesi di partenza o quando i beni esportati saranno caratterizzati da un'elevata impronta idrica verde mentre saranno riconosciuti dannosi, quindi potenzialmente correggibili, nel momento in cui la produzione impoverisce le risorse idriche locali, l'ambiente e le popolazioni a esso correlate nel paese esportatore.

RIASSUNTO

Il concetto di acqua virtuale, introdotto nel 1993 dal professor Allan del King's College London, definisce l'acqua necessaria a produrre i cibi, i beni e i servizi che consumiamo quotidianamente. Nel 2003, a partire da tale definizione, Arjen Hoekstra – direttore del Water Footprint Network – sviluppa il concetto di impronta idrica: un indicatore del consumo d'acqua, applicabile a singoli individui, comunità o aziende, che misura il volume d'acqua necessario a produrre cibi, beni e servizi consumati dal soggetto considerato. Dal momento che l'acqua ricopre un ruolo centrale sia in natura che per ogni attività umana, risulta particolarmente importante studiare una possibile diminuzione della sua disponibilità a fronte dei cambiamenti climatici e dell'aumento demografico a livello globale, tanto più perché è la produzione di cibo la più esigente in termini di risorse idriche. In questo senso, i concetti sopra descritti introducono nuovi strumenti per valutare la sostenibilità ambientale delle produzioni agrarie e zootecniche; infatti, non solo ci rivelano la quantità d'acqua totale consumata durante l'intero ciclo produttivo, ma ci permettono inoltre di suddividere tale totale in due componenti: acqua "verde", di origine piovana, intrinseca al sistema pioggia-suolo-pianta; acqua "blu", derivante da fiumi, laghi o dal sottosuolo e somministrata tramite l'irrigazione, che a differenza della componente verde può essere impiegata anche in settori alternativi, avendo quindi un costo (sia economico che ambientale).

ABSTRACT

The virtual water concept. The concepts of virtual water and water footprint can provide new instruments to better understand the sustainability of agricultural production. The idea of virtual water was introduced in 1993 by professor Allan of King's College London and it defines the amount of water that is necessary to produce the food, goods and services that we daily, generally, use. In 2003, Arjen Hoekstra – founder of the Water Footprint Network – develops the water footprint concept: it is an indicator of water consumption that can be applied to individuals, communities or companies. Since water is crucial as in nature as for every human activity, studying the possibility of its decrease, due to global climate changes and to population growth, is particularly important. Hence, the above described concepts introduce new ways to evaluate the agricultural production sustainability, especially in terms of water consumption. In fact, those concepts reveal the total amount of water consumed during agricultural production, along with its natural provenience (rain or irrigation water). Summing up, the virtual water and the water footprint concepts offer new points of views in the study of agricultural production processes, turning out to be very useful in the assessment of agricultural production sustainability.

BIBLIOGRAFIA

- ALDAYA M.M., ALLAN J.A., HOEKSTRA A.Y. (2010): *Strategic importance of green water in international crop trade*, «Ecological Economics», 69, pp. 887-894.
- ALLAN J.A. (1993): *Fortunately there are substitutes* for water otherwise our hydro-political futures would be impossible, in *Priorities for water resources allocation and management*, ODA (Ed.), London, pp. 13-26.
- ANTONELLI M., GRECO F. (2013): *L'acqua che mangiamo cos'è l'acqua virtuale e come la consumiamo*, Edizioni Ambiente (Ed.), Milano, 288 pp.
- FADER M., GERTEN D., THAMMER M., HEINKE J., LOTZE-CAMPEN H., LUCHT W., CRAMER W. (2011): *Internal and external green-blue agricultural water footprints of nations, and related water and land savings through trade*, «Hydrology and Earth system sciences discussions», 8, pp. 483-527.
- HOEKSTRA A.Y., CHAPAGAIN A.K., ALDAYA M.M., MEKONNEN M.M. (2011): *The water-footprint assessment manual: setting the global standard*, Earthscan (Ed.), London, 228 pp.
- MEKONNEN M.M., HOEKSTRA A.Y. (2011): *The green, blue and grey water footprint of crops*, UNESCO - IHE Institute for Water Education (Ed.), The Netherlands, 42 pp.
- MEKONNEN M.M., HOEKSTRA A.Y. (2012): *A Global Assessment of the Water Footprint of Farm Animal Products*, «Ecosystems», 15, pp. 401-415.
- WWAP WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME (2012): *The United Nations world water development Report 4: Managing water under uncertainty and risk*, WWDR4 UNESCO.

Il sistema biologico del suolo in relazione alla risorsa idrica

INTRODUZIONE

Il compito che attende l'agricoltura nei prossimi anni è sempre lo stesso, cioè provvedere la comunità umana del cibo necessario alla sua sussistenza. Purtroppo a complicare le cose ci sono i problemi del *climate change*, della disponibilità idrica, della degradazione dei suoli e, non ultimo, della eccessiva sovrappopolazione del pianeta (attesi circa nove miliardi nel 2050).

Già il solo incremento della popolazione, che comporterà in pratica una drastica riduzione della superficie agricola pro-capite, quella cioè disponibile per sfamare ogni individuo, rappresenta una sfida tecnologica tremendamente ardua. Dovremo essere capaci di incrementare almeno del doppio gli attuali livelli di produttività per ettaro. Ad aggravare le cose va poi aggiunta la progressiva perdita di terreni coltivabili per cause antropiche, quali inquinamento, urbanizzazione e *climate change*. L'alterazione del profilo climatico potrebbe infatti provocare un cambiamento del profilo geografico di alcune colture, l'ulteriore perdita di terre coltivabili e la diminuzione delle risorse idriche disponibili. Relativamente alla diminuzione delle risorse idriche si dovrà anche considerare la forte competizione tra agricoltura e altri utilizzi (domestici e industriali) e l'effetto dell'inquinamento.

Sarà quindi necessario, per non dire vitale, lo sviluppo di una agricoltura che, rispettando l'ambiente e le sue risorse, risulti capace di adattarsi ai cambiamenti ambientali e nel contempo permetta di combinare una elevata produttività con la qualità nutrizionale degli alimenti.

* Dipartimento di Scienze delle Produzioni Agroalimentari e dell'Ambiente (DISPAA), Università di Firenze

Alla base di tale rinnovamento fondamentale sarà la nostra capacità di percepire il suolo non più come un mero substrato ma come un complesso sistema biologico, il più ricco ecosistema terrestre in termini di biodiversità, essenziale non solo per fornire alimenti ma anche per regolare il clima, depurare le acque, degradare e riciclare rifiuti.

L'ACQUA

L'acqua rappresenta una risorsa primaria per la presenza e il sostentamento della vita sul nostro pianeta. Purtroppo l'acqua dolce, cioè quella utile per l'uomo e le sue attività, risulta limitata. Infatti l'acqua sulla terra è per il 97% salata e solo il rimanente 3% è rappresentato da acqua dolce. La criticità di questo dato viene ulteriormente aggravata dal fatto che molta acqua dolce non è facilmente disponibile; infatti, il 68% dell'acqua dolce è contenuto nei ghiacciai, un ulteriore 30% risulta presente nel sottosuolo (acqua sotterranea) e solo l'1% circa è presente in superficie, in forma liquida e quindi immediatamente utilizzabile (fiumi, laghi e stagni).

Ad aggiungere ulteriore "drammaticità" vi è la constatazione di una progressiva erosione del "limitato" quantitativo di acqua dolce per cause antropiche, quali inquinamento e contaminazione, oltre all'eccessivo consumo con salinizzazione delle riserve di acqua del sottosuolo (falda freatica), soprattutto nelle zone costiere, per risalita di acqua marina salata. Relativamente ai fenomeni di inquinamento delle acque dolci è da considerare che ogni anno circa due milioni di persone muoiono a causa dell'utilizzo di acque inquinate e/o contaminate per uso domestico (alimentazione). A ciò si devono aggiungere gli effetti generati dal riscaldamento globale. Infatti, il progressivo innalzamento delle temperature provoca lo scioglimento delle riserve idriche contenute nei ghiacciai che vanno per la maggioranza a finire nel mare, diventando così salate e non utilizzabili. Inoltre l'aumento dei fenomeni di "bombe d'acqua", cioè eventi piovosi intensi e brevi, sempre generato dal *climate change*, oltre a causare una perdita di acqua dolce, generano anche intensi fenomeni di erosione nei suoli, con perdita degli orizzonti superficiali più fertili, generando quindi anche un danno all'agricoltura. Da considerare che i tempi di ricostituzione delle riserve idriche del suolo, soprattutto per la ricostituzione della falda freatica profonda, sono molto lunghi.

A tutto questo si deve aggiungere il costante e drammatico incremento demografico che porterà nel 2050 alla presenza di circa nove miliardi di persone sul nostro pianeta. Questo causerà una drastica riduzione del quantitativo di

acqua dolce pro-capite che andrà ad abbinarsi alla corrispondente riduzione della superficie coltivabile pro-capite, rappresentando una sfida tecnologica estrema per le future generazioni, e se non adeguatamente fronteggiata, avrà esiti devastanti sia sulla popolazione mondiale sia sugli equilibri geo-politici attualmente in essere. Infine da considerare anche la progressiva erosione della quantità di acqua destinata attualmente all'agricoltura (circa il 70%) per utilizzi industriali e domestici.

RILEVANZA DELL'ACQUA PER FERTILITÀ DEL SUOLO

Sulla Terra l'acqua copre il 70,8% della sua superficie, e, più o meno con la stessa percentuale, è il maggior costituente del corpo umano. Estendendo tale similitudine a un suolo e alla sua funzionalità, e quindi alla sua fertilità, l'acqua tellurica è paragonabile al sangue, e la struttura del suolo, con la sua porosità e la presenza di capillari, è paragonabile al sistema venoso e arterioso. Nell'insieme, la struttura del suolo e l'acqua tellurica rappresentano il sistema circolatorio del suolo e come tali garantiscono la circolazione nei nutrienti all'interno del suolo, l'eliminazione delle scorie, la regolazione termica e il movimento di elementi costituzionali, di estrema importanza per la funzionalità del suolo. Oltre a questo, il movimento dell'acqua sia superficiale che sotto superficiale rappresenta un importante fattore di formazione ed evoluzione del suolo (pedogenesi ed erosione).

Lo stato fisico con cui l'acqua è presente nel suolo ha un forte impatto sulla sua funzione e disponibilità. Per esempio l'acqua sotto forma nivale esercita un'azione di controllo termico del suolo, sia impedendo che l'orizzonte sotto il manto nevoso raggiunga temperature sotto lo zero, sia evitando che l'acqua tellurica superficiale ghiacci. Inoltre, la neve, avendo colorazione bianca, contribuisce ad aumentare la capacità della terra di riflettere la radiazione solare incidente, contenendo il riscaldamento globale del pianeta. Quando l'acqua è allo stato liquido, consente di contenere il riscaldamento degli orizzonti superficiali in modo diretto e indiretto: direttamente attraverso il fenomeno dell'evaporazione che, così come nel corpo umano attraverso la sudorazione, consente di smaltire calore nel passaggio di stato dell'acqua da liquida a gassosa; indirettamente attraverso la copertura vegetale del suolo, presente grazie all'acqua tellurica, la quale, attraverso l'azione dei pigmenti riflette la radiazione incidente, ne riduce il valore realmente insistente sul suolo.

Relativamente all'utilizzo dell'acqua da parte degli organismi viventi presenti nel suolo, la quantità effettivamente utilizzabile, cioè bio-disponibile,

è espressa come *attività dell'acqua* (aw) e rappresenta un parametro molto importante per determinare la fertilità di un suolo, indipendentemente dalla quantità totale di acqua tellurica. L'*attività dell'acqua* è definita come il rapporto fra tensione del vapor d'acqua del suolo (P) e la tensione del vapor d'acqua (P_o) allo stato puro, alla stessa temperatura: $aw = P/P_o$.

L'acqua pura ha una $aw = 1$, ciò significa che con valori di aw vicini a 1 siamo di fronte ad acqua quasi completamente disponibile, mentre con valori di aw significativamente al di sotto di 1, l'acqua comincia a essere trattenuta dal suolo fino ad arrivare a non essere più disponibile per gli organismi viventi (microrganismi e piante). L'optimum di aw per lo sviluppo microbico è molto vicino allo 0,9 con valori minimi vicini a 0,6.

La quantità di acqua liquida presente in un suolo e le sue variazioni possono giocare un ruolo rilevante nella produzione e rilascio di gas serra nell'atmosfera, quali N_2O , CH_4 , CO_2 . Infatti i fenomeni di sommersione, inducendo un ambiente anaerobico nel suolo, favoriscono lo sviluppo di condizioni riducenti e di comunità microbiche anaerobiche, le quali, degradando la sostanza organica, producono CH_4 , con conseguente potenziale effetto serra di circa 30 CO_2 equivalenti. Nelle fasi invece di alternanza tra sommersione e areazione, quindi di condizioni riducenti e ossidanti, si ha sviluppo di ossidi di azoto, gas con il più elevato potenziale effetto serra (circa 300 CO_2 equivalenti). Nelle normali condizioni di umidità invece i suoli sono definiti aerobici con condizioni prevalentemente ossidanti, e le comunità batteriche in essi presenti svolgono al meglio i processi degradativi della sostanza organica, con abbondante sviluppo di CO_2 .

Relativamente all'effetto che l'atteso incremento di CO_2 nell'atmosfera potrebbe esercitare sul contenuto idrico e aw del suolo, dati sperimentali hanno evidenziato come elevati valori di CO_2 atmosferici causeranno probabilmente, assieme a un attendibile incremento della produttività delle piante, anche un loro miglioramento nella *Water Use Efficiency* (WUE), espressa come grammi di biomassa prodotta per chilogrammo di acqua consumata, a causa della riduzione dei fenomeni di evapo-traspirazione (ET). Questo dovrebbe generare un incremento del contenuto idrico dei suoli.

APPROCCI PER MIGLIORARE L'EFFICIENZA DI UTILIZZO DELL'ACQUA NEL SUOLO

Al fine di migliorare la capacità di accumulo di acqua del suolo, particolare attenzione deve essere posta nella scelta delle idonee pratiche di *soil management*, al fine di migliorarne le caratteristiche chimico-fisiche necessarie a incre-

mentarne la capacità di invaso. In questo modo il suolo sarà più efficiente nel gestire gli eccessi idrici, sia in difetto (siccità) che in eccesso (forte ruscellamento superficiale e anche sommersione), attenuandone la comparsa e le conseguenze in termini di riduzione e anche compromissione della fertilità. Nel caso di forte carenza di acqua, il progressivo inaridimento degli orizzonti superficiali causa fenomeni di fessurazione profonda, con conseguente incremento delle perdite di acqua per evaporazione. Inoltre, l'eccessiva polverulenza del suolo superficiale lo rende fortemente soggetto a fenomeni erosivi eolici. Viceversa, in caso di eccesso idrico, nei suoli con pendenza si ha la saturazione del suolo con induzione di fenomeni di ruscellamento superficiale, con conseguenti fenomeni erosivi (idrici); nel caso di suoli pianeggianti o in avvallamenti, si possono avere fenomeni di sommersione, con perdita di funzionalità da parte dei suoli e conseguenti problemi di utilizzo per l'agricoltura.

Il principale obiettivo a cui si deve mirare per garantire al suolo la migliore efficienza nell'utilizzo dell'acqua è lo sviluppo di una strutturazione del suolo, attraverso la formazione degli aggregati (micro- e macro-aggregati). Attraverso la formazione e il corretto rapporto tra micro e macro-aggregati si viene a creare nel suolo una micro e macro porosità, fondamentale per garantire al suolo la capacità di trattenere e diffondere sia soluti che gas negli strati sottosuperficiali. Tale organizzazione viene definita "struttura" la quale induce nel suolo anche la possibile risalita per capillarità dell'acqua contro il gradiente di gravità, richiamata dagli strati più profondi a causa dell'evaporazione dell'acqua superficiale. Questo è possibile grazie alla interconnessione tra i pori degli aggregati che si susseguono lungo il profilo e che vanno a formare una rete di capillari che permette la risalita dell'acqua, grazie alla tensione superficiale dei menischi di acqua che ivi si formano.

La formazione degli aggregati dipende dalla tessitura del suolo e dalla presenza di sostanza organica e altri cementi. Nel caso della tessitura, cioè della distribuzione dimensionale dei componenti minerali presenti, la presenza della frazione argillosa (fra cui minerali argillosi secondari, originatisi dalla alterazione delle rocce primarie), dotata di proprietà colloidali (cioè di aggregare i vari minerali in base alla carica superficiale), è molto importante nella formazione degli aggregati. Similmente la presenza di sostanza organica, sia nella sua componente meno degradabile, sia come componente colloidale, conferisce al suolo la capacità di aggregare i vari componenti minerali per formare aggregati, grazie alla presenza di gruppi funzionali. Tali aggregati risultano sufficientemente stabili al variare dei parametri ambientali, permettendo così al suolo una buona capacità di mantenere la efficienza funzionale e quindi la fertilità in condizioni di stress idrici.

Di interesse sono anche le recenti prove di un forte coinvolgimento della componente biotica (microrganismi) nel regolare l'organizzazione strutturale dei suoli in relazione agli stress idrici. Sono stati infatti recentemente studiati dei batteri capaci di modificare il diametro dei pori negli aggregati al variare del contenuto idrico del suolo aumentandone il diametro in presenza di acqua e, viceversa, diminuendolo in caso di carenza.

Di notevole rilevanza sono anche le strategie adattative "passive", senza alterazione dell'ambiente circostante, che i microrganismi possono mettere in atto per resistere alle condizioni di stress idrici e ambientali. Tra queste ricordiamo la capacità di sporificare, cioè di entrare in uno stato di quiescenza con ridottissima attività metabolica, simile al letargo per alcuni animali. Da citare poi la capacità di formare dei biofilm protettivi che isolano le colonie batteriche dall'ambiente circostante creando una micro-nicchia più ospitale rispetto all'ambiente esterno, con conseguente aumento delle capacità di resistenza e persistenza della colonia batterica. Tale fenomeno avviene attraverso la capacità di indurre alcuni componenti della comunità al sacrificio estremo, cioè alla morte per lisi cellulare, in modo da permettere agli altri di salvarsi dallo stress idrico tramite la formazione dei biofilm. Tale strategia è definita *kin selection*. Di notevole rilevanza è inoltre da ricordare il processo noto come *vetrificazione citoplasmatica*. Tale strategia permette ai batteri di rispondere ai danni da carenza idrica attraverso l'aumento della concentrazione dei soluti cellulari, in modo da evitare la perdita di liquidi per osmosi. Relativamente alla resistenza alle basse temperature, alcuni batteri individuati nei suoli artici hanno mostrato la capacità di indurre la formazione di ghiaccio sulla loro superficie prima che la temperatura raggiunga lo zero, evitando di ghiacciare e quindi andare incontro a morte per lisi cellulare, indotta dal repentino e drastico aumento di volume dell'acqua intracellulare. Tali batteri sono definiti *ice nucleating bacteria*. Un'ulteriore strategia adattiva è quella associata alla capacità di alcune specie batteriche di fare corrispondere a un unico genotipo, ovvero un unico patrimonio genetico (DNA), una differente espressione dell'informazione in esso contenuta, in modo da avere fenotipi diversi, ovvero individui della stessa specie con caratteristiche diverse. In questo modo, al variare delle condizioni ambientali ci sarà sempre un fenotipo adatto. Tale strategia viene definita *bet-hedging*. Relativamente all'adattabilità delle piante a condizioni di carenza idrica è da citare una ricerca finanziata con il progetto Firb "*Strategy to improve crop productivity under water stress conditions*", del Ministero dell'Università e della Ricerca italiano e dall'Unione europea, nell'ambito del progetto Bidesert, e supportata dall'Università degli Studi di Milano, dall'European social fund e dalla Regione Lombardia.

La ricerca ha evidenziato l'importanza delle interazioni tra microrganismi e apparato radicale nel favorire la crescita vegetale anche in condizioni di forte scarsità di acqua. Il *desert farming*, ovvero «le pratiche agricole messe in atto nell'agricoltura in regioni aride e desertiche, sono un fattore cruciale per la selezione di microrganismi benefici nel suolo che sono in grado di sostenere la crescita vegetale in condizioni di siccità». Nel 2012, una ricerca condotta da Ramona Marasco e colleghi, intitolata “A Drought Resistance-Promoting Microbiome Is Selected by Root System under Desert Farming” e pubblicata su Plos One, ha ribadito la rilevanza delle interazioni pianta-microrganismi e suolo, proprie della rizosfera, per aumentare l'efficienza di utilizzo delle risorse idriche da parte delle piante. Nella ricerca si è descritto l'arricchimento di suoli aridi con batteri capaci di incrementare la fotosintesi e quindi la produzione di biomassa del 40%.

Una società situata negli Emirato Arabi Uniti (EAU), “DIME” ha creato una sabbia impermeabile idrofoba. L'obiettivo è quello di impedire il rilascio dell'umidità che si forma nel deserto durante la notte, rendendola disponibile alle radici delle piante. Questo sottilissima coltre di “super sabbia”, caratterizzata da bassa richiesta idrica dovuta alla maggior efficienza nel suo utilizzo, è attualmente in fase di produzione al ritmo di 3000 tonnellate al giorno e promette una rivoluzione nella coltivazione dei suoli aridi. L'utilizzo dell'umidità atmosferica sotto forma di nebbia è stata applicata nel deserto dell'Atacama (Atacama è uno di quei rari casi – come il Namib Desert della Namibia – in cui per un mix di ragioni orografico-climatiche, tanto più ci si avvicina il mare tanto meno piove) attraverso l'utilizzo di speciali teli per raccogliere l'umidità che risale dal vicino Pacifico la quale, successivamente alla sua condensazione per inversione termica, verrà fatta poi percolare in apposite piscine di raccolta. Tale tecnica ha permesso di riforestare zone desertiche dell'Atacama. Le maglie di solito sono realizzate con materiali plastici facilmente ottenibili e poco costosi. Questa tecnica è stata recentemente migliorata dagli scienziati del MIT, attraverso una speciale struttura in grado di raccogliere fino a cinque volte il quantitativo che fino a ora era possibile raccogliere. Tale incremento dell'efficienza di raccolta dell'acqua è stato ottenuto stringendo le maglie delle reti giganti, studiate per convogliare le goccioline raccolte in un contenitore finale. La migliore efficienza di raccolta è stata ottenuta utilizzando maglie ottenute con cavi di acciaio inox dello spessore di 3 o 4 volte un capello umano, distanziate di circa il doppio della loro misura.

La rete messa a punto presenta inoltre come particolarità un rivestimento che consente alle piccole gocce di scivolare più facilmente giù nella canalina di raccolta non appena si formano, prima che il vento le soffi fuori dalla superficie e le reinserisca nel flusso della nebbia.

Un'ulteriore tecnica, da poter applicare nel caso di suoli sabbiosi per indurre la formazione di una struttura e quindi della capacità di meglio gestire la risorsa idrica, consiste nello stimolare la formazione delle croste biologiche. Lo sviluppo di tali croste si basa sull'inoculo nel suolo di ciano batteri, organismi fotosintetizzanti con capacità di estrarre composti polisaccaridici. Tali batteri possono così ingenerare il ciclo del carbonio nel suolo favorendo inoltre la formazione di una microstruttura superficiale con conseguente capacità di supportare la crescita e la successione di altre piante, definite pioniere. L'attività radicale di tali piante, attraverso l'estrusione di vari composti organici (essudati radicali), necessari per il reperimento dei nutrienti e per indurre la formazione di struttura nel suolo limitrofo (la rizosfera), estenderebbe la fertilità del suolo anche agli orizzonti sottosuperficiali.

Relativamente all'utilizzo di acque con elevato contenuto salino è necessario conoscerne il livello di salinità applicando la formula del *leaching requirement* che calcola la quantità addizionale rispetto alle richieste delle coltivazioni in essere, ed è atta a compensare l'igroscopicità del sale che riduce la quantità di acqua disponibile per le piante (vedi attività dell'acqua). Tale accorgimento, nei casi di scarsa disponibilità idrica, sarà poi abbinata alla *drop irrigation* che, distribuendo l'acqua in prossimità della rizosfera, permette una riduzione del quantitativo richiesto e sposta inoltre l'eccesso salino ai margini della zona di radicazione. Questa tecnica risulta particolarmente utile in caso di salinità sodica delle acque e/o del suolo; questa è infatti particolarmente pericolosa a causa del carattere deflocculante del sodio in presenza di acque, che compromette così la stabilità degli aggregati con conseguente destrutturazione del suolo.

CONCLUSIONI

Il presente articolo non vuole essere una esaustiva trattazione della rilevanza dell'acqua per l'agricoltura ma solo fornire al lettore un primo approccio sulla tematica sottolineando alcune "particolarità" di interesse utili per una migliore comprensione dell'argomento nei successivi approfondimenti che il lettore riterrà opportuno attuare.

A conclusione di quanto riportato è doveroso considerare l'attuale prevalenza di un'agricoltura di tipo intensivo esclusivamente dedicato all'ottenimento delle massime rese produttive. Tale modello agricolo non considera l'utilizzo ecosostenibile delle risorse naturali né la salvaguardia della biodiversità in relazione alla flessibilità adattativa dell'ecosistema agricolo agli stress

ambientali, quali quelli indotti dal cambiamento climatico, risultando quindi assolutamente inadatto a rispondere alle sfide attese.

Alla base del rinnovamento richiesto all'agricoltura deve esserci la percezione del suolo come un complesso sistema biologico, essenziale non solo per fornire alimenti ma anche per regolare il clima, depurare le acque, degradare e riciclare rifiuti, stoccare in modo sicuro inquinanti (*ecological services*). Questa rivoluzione culturale rispetto al suolo dovrà riguardare soprattutto gli agricoltori che dovranno sentire l'onore e la responsabilità di gestire al meglio un patrimonio dell'umanità capace di fornire un elevato numero di *ecological services*.

Questo dovrà essere sostenuto dallo sviluppo delle nostre capacità di selezione di nuove varietà di piante, capaci di meglio adattarsi alle condizioni ambientali attese, e di integrare e gestire le possibilità legate alle nuove tecnologie per selezionare le migliori pratiche agricole e valutarne l'efficienza. Tutto ciò permetterà di realizzare un'agricoltura vicina al raggiungimento del *zero CO₂ emission production e del close the loop* nella gestione delle risorse, massimizzandone il riciclo.

RIASSUNTO

Il compito che attende l'agricoltura nei prossimi anni è sempre lo stesso, cioè provvedere la comunità umana del cibo necessario alla sua sussistenza. Purtroppo a complicare le cose ci sono i problemi del *climate change*, della disponibilità idrica, della degradazione dei suoli e, non ultimo, della eccessiva sovrappopolazione del pianeta (attesi circa nove miliardi nel 2050).

Ad aggravare le cose va poi aggiunta la progressiva perdita di terreni coltivabili per cause antropiche, quali inquinamento, urbanizzazione e *climate change*. L'alterazione del profilo climatico potrebbe infatti provocare un cambiamento del profilo geografico di alcune colture, l'ulteriore perdita di terre coltivabili e la diminuzione delle risorse idriche disponibili.

Sarà quindi necessario, per non dire vitale, lo sviluppo di una agricoltura che, rispettando l'ambiente e le sue risorse, risulti capace di adattarsi ai cambiamenti ambientali e nel contempo permetta di combinare una elevata produttività con la qualità nutrizionale degli alimenti.

Alla base di tale rinnovamento fondamentale sarà la nostra capacità di percepire il suolo non più come un mero substrato ma come un complesso sistema biologico, il più ricco ecosistema terrestre in termini di biodiversità, essenziale non solo per fornire alimenti ma anche per regolare il clima, depurare le acque, degradare e riciclare rifiuti.

ABSTRACT

The main goal that characterize the agriculture in the near and far future will be the same of the past one, supply the human community of enough food. Unfortunately respect to the past there are now new and relevant aspect to consider such as climate change,

increase of human population, water availability, pollution and the dominance of a non conservative intensive agriculture model that is totally devoted to the yields without consider the food quality and sustainability.

It is well known that life in soil is key to sustaining our food production, ecosystem maintenance and control of global atmosphere and climate warming, exerting thus a relevant *ecological service*. On this assumption it will be necessary to develop of a new *smart agricultural system* characterize by an high Economical and Environmental sustainability, in the respect of the environment, to maintain yields and to increase food quality. With the intent to *close the loop* of resource management maximizing their recycling, new soil management (abiotic and biotic) practices and plant breeding should be develop, coupled with the utilization of the remote sensing of intra-field variations data to evaluate the efficiency of adopted strategy. In this way the agricultural soil could operate *ecological services*.

Il sistema pianta e lo stress idrico

INTRODUZIONE

Le piante hanno acquisito nel corso dei millenni la capacità di difendersi da stress biotici causati dall'attacco di vari microrganismi (tra cui virus, batteri, oomiceti, funghi) e macroorganismi (tra cui nematodi, insetti e acari), che possono portare a morte un numero rilevante di piante verdi e di coltivazioni d'interesse agrario, forestale e ornamentale con gravi conseguenze economiche e ambientali. Non meno pericolosi sono i fattori abiotici, come per es., la carenza di acqua, l'eccesso di calore, il freddo estremo, una forte salinità (spesso strettamente collegata alla carenza di acqua). Tutti questi fattori possono determinare l'instaurarsi di una malattia o di un disordine fisiologico nelle piante. Fortunatamente queste ultime sono generalmente in grado di difendersi mettendo in campo una serie di reazioni di difesa che, se sufficientemente tempestive e intense, possono portare all'instaurarsi di forme di tolleranza e di resistenza.

Per arginare i danni alle piante e alle coltivazioni a opera di stimoli biotici sono in uso da anni numerosi agrofarmaci che sfortunatamente nel tempo possono perdere di efficacia per l'insorgere di ceppi resistenti a essi nelle popolazioni dei patogeni oppure possono arrecare danni alla salute umana per i residui tossici nelle parte eduli o all'ambiente se sono usati in eccesso o se vi permangono. In alternativa sono state selezionate varietà per resistenza ai patogeni oppure, più recentemente, sono state sviluppate varietà genetica-

* *Dipartimento di Scienze Biomediche Sperimentali e Cliniche – sezione Biochimica, Università di Firenze*

** *Dipartimento di Scienze delle Produzioni Agroalimentari e dell'Ambiente (DISPAA), Università di Firenze*

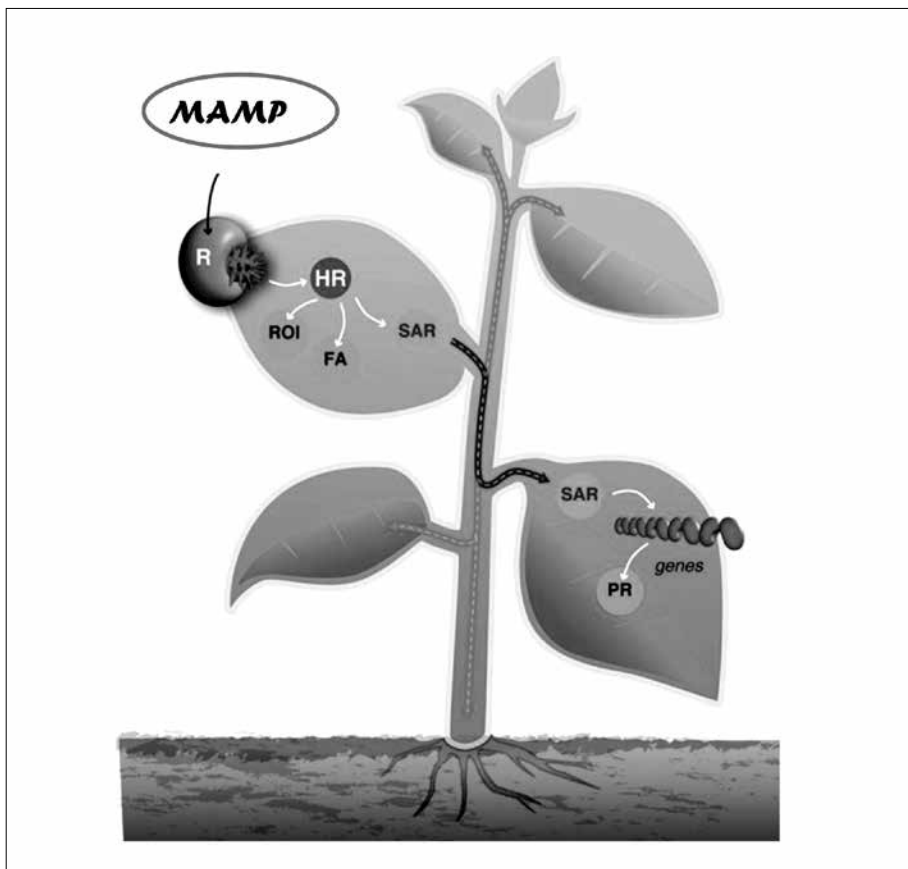


Fig. 1 Sistemi di difesa localizzata (HR, Hypersensitive Response) e sistemica (SAR, Systemic Acquired Resistance). R, recettore; PR, proteine di difesa ROI, Reactive Oxygen Intermediate (specie reattive dell'ossigeno) FA, fitoalessine. Modificato da: wps.prenhall.com

mente modificate con tutte le limitazioni legali e d'immagine che tale pratica comporta. Per quanto riguarda la difesa delle piante nei confronti degli stress abiotici, finora la linea maggiormente seguita o proposta è stata quella di sviluppare varietà resistenti selezionate con le tecniche di miglioramento genetico tradizionale oppure con le tecniche più moderne di ingegneria genetica.

Un approccio innovativo e promettente consiste nella stimolazione e/o nel potenziamento delle risposte di difesa delle piante mediante l'uso di molecole di origine microbiologica o vegetale chiamate "elicitori"; con questo termine si indicano quelle molecole che sono in grado di stimolare nelle piante una risposta immune, cioè di resistenza. Gli elicitori possono essere "esogeni", cioè molecole essenziali per i microorganismi e quindi conservate nei pato-

geni, non patogeni e saprofiti, e questo caso prendono il nome di MAMPs (Microbe-Associated Molecular Patterns = strutture molecolari associate al microrganismo), oppure “endogeni”, cioè molecole vegetali rilasciate in seguito all’azione dei microrganismi sui tessuti vegetali (per esempio la degradazione dei costituenti parietali a opera di enzimi idrolitici) e chiamate DAMPs (Damage-Associated Molecular Patterns = strutture molecolari associate al danno) (Newman et al., 2013).

In seguito al riconoscimento di un segnale non-self, le cellule vegetali vanno incontro a una serie di modificazioni metaboliche che portano alla produzione di molecole antimicrobiche (come le fitoalessine), al rafforzamento della parete vegetale e alla produzione di una vasta gamma di peptidi e proteine di difesa chiamate proteine PR (Pathogenesis-Related = correlate con la patogenesi) caratterizzate da una forte attività antimicrobica diretta e indiretta. La percezione di un elicitore porta, inoltre, a innalzare il livello di resistenza della pianta contro attacchi futuri. Si parla di resistenza indotta che si instaura sia a livello locale (al sito di danno) che a livello sistemico, per cui la pianta si trova in uno stato di “priming” potendo innescare le risposte di difesa in modo più rapido e/o efficace ai successivi stress biotici o abiotici (fig. 1).

I SISTEMI DI DIFESA DELLE PIANTE

Una malattia non è *sic et simpliciter* l’effetto dell’azione di un fattore di stress sulla pianta; all’atto della sua insorgenza e al suo sviluppo concorrono più fattori i cui effetti possono sommarsi sia positivamente ad accelerare la patogenesi sia negativamente a rallentarla. Così come per gli uomini si è cominciato quindi a parlare di System Medicine per indicare che lo stato di malattia e guarigione non può essere affrontato e risolto se non considerando un insieme concomitante di fattori, anche nel campo del pianeta pianta potremmo parlare di System Agriculture per indicare quel fenomeno per cui diversi stimoli possono concorrere alla stato finale di salute di una pianta. Stimoli di stress di natura estremamente diversa, dai patogeni alla siccità al calore o al freddo eccessivi, a livello molecolare inducono un’attivazione di vie di segnalazione intracellulari che spesso convergono su medesimi mediatori o messaggeri che danno alla cellula l’informazione di difendersi per contrastare il fattore di stress (Piterková et al., 2013; Krishnamurthy et al., 2013).

Le piante rispondono a questi stimoli attivando, per es., recettori di membrana che possono riconoscere gli elicitori (MAMP o DAMP) sul lato extracellulare o rispondere a segnali come variazioni di permeabilità e di flussi

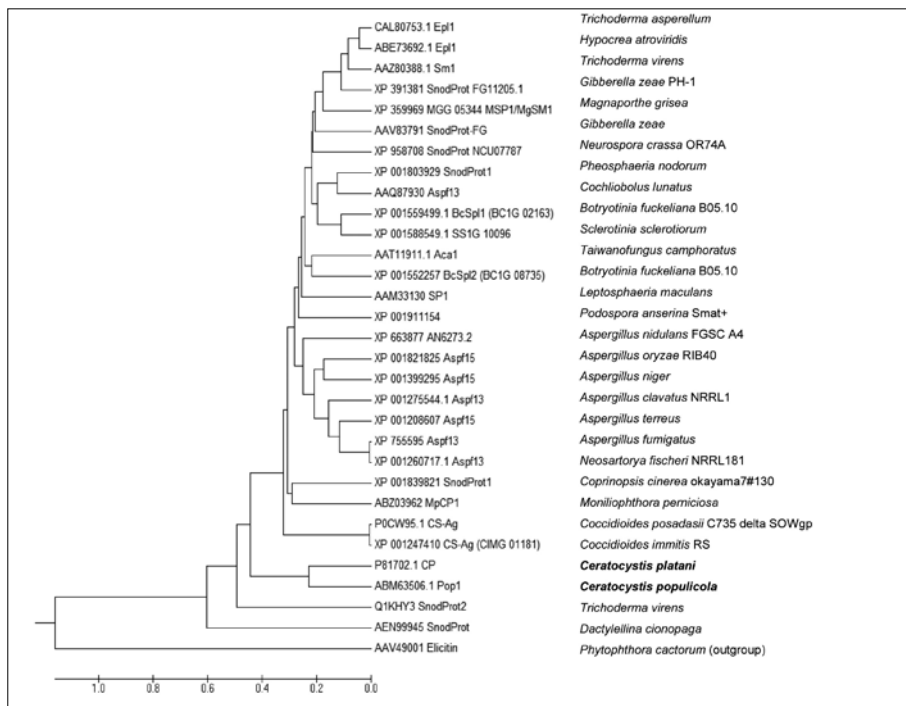


Fig. 2 Relazioni filogenetiche tra cerato-platanine. È stata presa in considerazione la sequenza della proteina matura, senza peptide segnale. CP e una sua proteina ortologa cerato-populina (Pop1) sono evidenziate in bold. Vengono riportati di fianco il numero di accesso della sequenza (NCBI, www.ncbi.nlm.nih.gov), il nome della proteina e il fungo da cui sono prodotte. La sequenza della elicina prodotta a *Phytophthora cactorum* viene usata come outgroup

ionici. Questi recettori sono infatti proteine transmembraniche o citoplasmatiche in grado di attivarsi innescando così una via di segnalazione che porta all'attivazione di proteine enzimatiche intracellulari che condurranno infine alla produzione di metaboliti secondari di difesa (Rafiqi et al., 2012).

Tra questi mediatori intracellulari rivestono particolare importanza nelle piante così come negli animali, le ROS (Reactive Oxygen Species = specie reattive dell'ossigeno), che sono in grado di indurre sia morte cellulare localizzata al fine di prevenire il diffondersi della malattia, sia di segnalare ulteriormente alla cellula che c'è bisogno di attivare altre vie di difesa per impedire alla pianta di ammalarsi (Baxter et al., 2013). Le ROS infatti, e l' H_2O_2 *in primis*, sono in grado di attivare le MAPK, letteralmente "proteine attivate da mitogeni", identificate inizialmente negli animali, dove partecipano a processi di accrescimento cellulare e trasformazione neoplastica e successivamente nelle piante dove par-

tecipano alla trasduzione di diversi segnali e sono attivate durante le risposte di difesa (Kar et al., 2011). Le MAPK inoltre vengono ulteriormente attivate dalle ROS innescando una via di segnalazione che porta all'attivazione di fattori di trascrizione che hanno il compito di far produrre elevate quantità di proteine di difesa PR. Sono attualmente conosciute 14 famiglie di queste proteine (PR1-14) e ognuna di esse partecipa a una particolare via di difesa a vario livello, ad esempio le PR 3, 4, 8 e 11 sono chitinasi, la PR11 è una defensina e la PR 14 è una Lipid Transfer Protein, coinvolta nel rimodellamento della membrana. Tra le vie di difesa che vengono attivate a valle ricordiamo anche la produzione di fitormoni, come acido salicilico (SA), acido jasmonico (JA) ed etilene (ET), e di fitoalessine, composti per lo più fenolici ad attività antimicrobica in grado di favorire anche l'adattamento a stress idrici (Ahuja et al., 2013).

La conclusione più evidente che possiamo trarre da queste osservazioni è quindi che la convergenza di risposte di difesa nelle piante è principalmente dovuta a una comunanza di mediatori di difesa intracellulari, primi tra tutti le ROS, ma anche le MAPK e i fitormoni.

Queste osservazioni portano a indirizzare la ricerca verso lo studio di quelle relazioni comuni che possono esserci tra stimoli biotici e abiotici. La domanda da porsi è la seguente: “È possibile aumentare la tolleranza di una pianta alla siccità aumentando le sue capacità difensive mediante il trattamento con elicitatori?”. Recenti linee di ricerca indicano che in alcuni casi si verifica un aumento di risposte di difesa in piante acclimatate ad uno stress abiotico o trattate con patogeni e viceversa suggerendo la possibilità di poter migliorare la resistenza allo stress idrico in piante trattate con elicitatori (Piterková et al., 2013; Ramegowda et al., 2013; Hanafy et al., 2013).

LA CERATO-PLATANINA COME MAMP FUNGINO

La cerato-platanina (CP, UniProt code P81702, PDB ID 2kqa) è una proteina secreta dal fungo ascomicete *Ceratocystis platani*, l'agente causale del cancro colorato del platano. A oggi, in banca dati la CP risulta la capostipite di una famiglia di proteine fungine prodotte sia da Ascomiceti che da Basidiomiceti e caratterizzate da un basso peso molecolare (11-13 kDa), da una elevata omologia di sequenza e dalla presenza di 2 ponti disolfuro intra-catena che rendono queste proteine particolarmente stabili e facilmente conservabili (Pazzagli et al., 1999; Pazzagli et al., 2006; de Oliveira et al., 2011). Tale famiglia ha preso appunto il nome di “Famiglia della cerato-platanina” ed è attualmente composta da più di 110 proteine recentemente identificate (fig. 2). Appartengono a questa famiglia

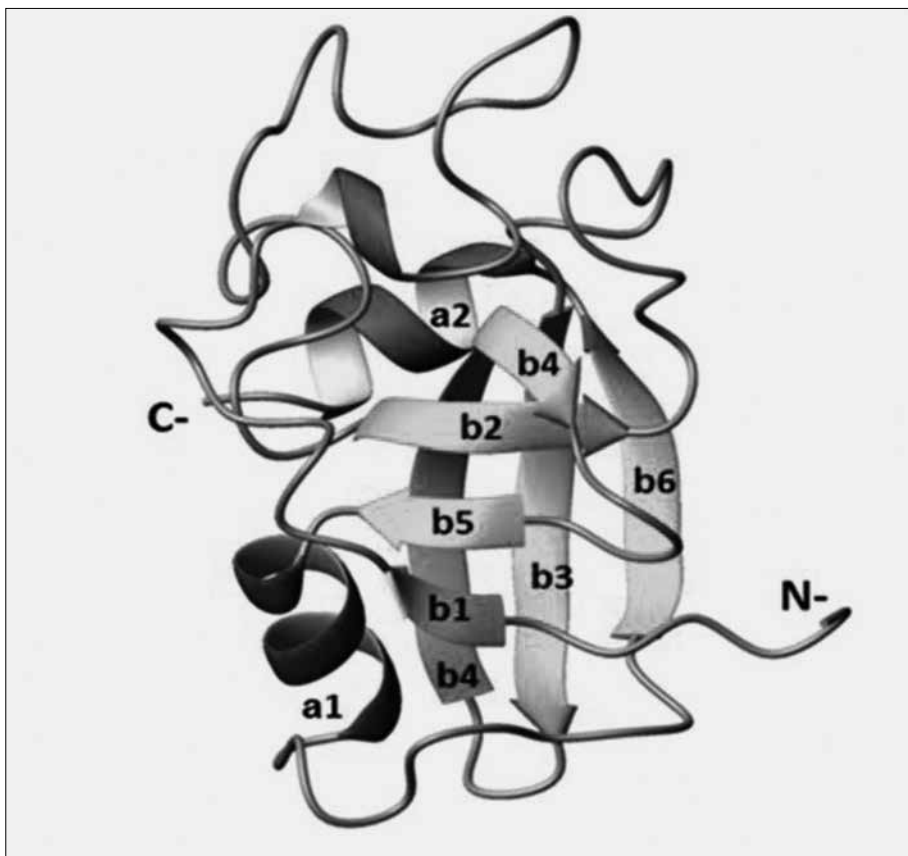


Fig. 3 Struttura tridimensionale della cerato platanina. La struttura è stata determinata mediante NMR multidimensionale. b 1-6: indicano i 6 β -sheets presenti nella struttura. a1 – a2: strutture ad α -elica. Modificata da: de Oliveira et al., J. Biol. Chem 2011

Snodprot1 prodotto da *Phaeosphaeria nodorum*, necessario per la virulenza; Sp1 prodotto da *Leptosphaeria maculans* che induce auto-fluorescenza nelle foglie di *Brassica napus* e MpCP1 in *Moniliophthora perniciosa*, in grado di indurre necrosi in foglie di tabacco e cacao. Inoltre, le proteine Sm1 e Epl1 prodotte da *Trichoderma virens* e *Trichoderma atroviride* inducono resistenza sistemica, mentre MgSM1 prodotta da *Magnaporthe oryzae* è in grado di indurre la risposta ipersensibile (HR) in foglie. La HR è anche indotta da BcSpl1, una proteina identificata recentemente e anche una delle più abbondanti nel secretoma di *Botrytis cinerea* (Pazzagli et al., 2014, Plant Science, in press).

La struttura tridimensionale della proteina è stata recentemente determinata mediante esperimenti di MNR multidimensionale che hanno indicato una

struttura compatta, chiamata *double ψ - β barrel* analoga a quella delle expansine, proteine prive di attività catalitica capaci di facilitare la rapida estensione e distensione della parete cellulare in modo da conservarne l'integrità, rompendo i legami non covalenti che uniscono i glucani (fig. 3). Sono presenti principalmente nei vegetali dove sono coinvolte nella crescita e nello sviluppo anche se recentemente sono state individuate proteine *expansin-like* nei batteri e nei funghi.

Dal punto di vista della funzione primaria, CP si è dimostrata essere coinvolta nei meccanismi di accrescimento e di rimodellamento del fungo produttore, come d'altra parte la sua struttura *expansin-like* lasciava presupporre (Baccelli et al., 2013a).

Dal punto di vista delle interazioni con piante, CP si è dimostrata essere in grado di attivare risposte tipiche della difesa primaria fra cui l'attivazione delle MAPK, l'overespressione di geni codificanti fattori di trascrizione (il fattore WRKY33) e di proteine coinvolte nella difesa come PR1, PR5, AGA (alkaline alpha galactosidase), UGT (uridinediphosphateglycosyltransferase) e la proteina 14-3-3: questi esperimenti sono stati condotti sia su platano che sulla pianta modello *Arabidopsis*, per cui è ragionevole proporre la CP come un MAMP generico, in grado di attivare risposte di difesa primaria (Baccelli et al., 2013b; Lombardi et al., 2013).

CP si è inoltre dimostrata in grado di indurre la sintesi di H_2O_2 e NO che sono appunto due molecole caratteristiche delle risposte di difesa e costituiscono il trait d'union tra le risposte di difesa innescate da stimoli biotici e le risposte innescate da stimoli abiotici come appunto la siccità o l'eccessivo calore (Lombardi et al., 2013; Baxter et al., 2013).

Questi dati sono ulteriormente confermati e allo stesso tempo ampliati dalla determinazione dell'induzione di resistenza: se CP viene pre-applicata sulla superficie di foglie di platano, viene inibita la crescita di conidi di *C. platani*; inoltre, CP è risultata efficace nel proteggere foglie di *Arabidopsis* dall'infezione di *Botrytis cinerea* e *Pseudomonas syringae* (Scala et al., 2004; Baccelli et al., 2014, unpublished). Evidentemente le fitoalessine e/o le ROS in genere e l' H_2O_2 *in primis*, prodotti in seguito al trattamento di foglie con CP esercitano la loro azione antimicrobica sugli agenti infettanti finora testati (Ahuja et al., 2012; Baxter et al., 2013).

CONCLUSIONI E PROSPETTIVE FUTURE

I risultati finora ottenuti dallo studio di CP nell'interazione con piante indicano come questa proteina sia efficacemente in grado di agire da elicitore

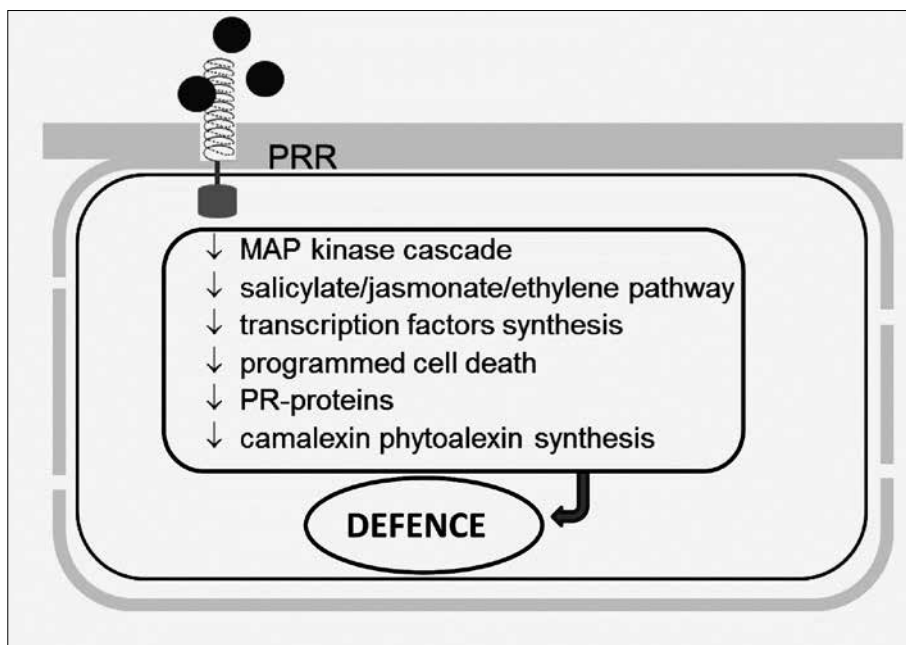


Fig. 4 *Rappresentazione schematica delle vie di difesa attivate da CP. Nello schema è indicata la CP (●) che interagisce con un ipotetico recettore (non ancora identificato) e attiva una via di segnalazione che porta all'attivazione delle MAPK, alla produzione di ROS, NO, Proteine di Difesa e Fitoalessine, tutti markers caratteristici di un'avvenuta attivazione delle vie di difesa*

generale di risposte di difesa e possa quindi essere a tutti gli effetti considerato un MAMP (Microbe Associated Molecular Pattern) in grado di indurre anche resistenza contro *Botrytis* e *Pseudomonas* quando usata in concentrazioni nell'ordine del micromolare (fig. 4). Contemporaneamente studi sulle relazioni struttura/funzione di CP hanno messo in luce come alcune regioni della proteina stessa e alcuni residui in particolare siano importanti nel determinare l'attività biologica della proteina stessa (de Oliveira et al., 2011; Baccelli et al., 2013a). Lo scopo ultimo di questo lavoro è quindi quello di identificare le regioni della proteina che sono particolarmente importanti per la sua attività biologica e di potenziare questa attività mediante ingegnerizzazione della proteina con tecniche di biologia molecolare e sintesi chimica di peptidi.

Una volta che abbiamo ottenuto un peptide attivo anche a concentrazioni micro-nanomolari che sia particolarmente stabile e solubile e quindi facilmente utilizzabile anche “in campo” potremo procedere al trattamento di piante e coltivazioni con questi elicitori che potremo definire di nuova generazione. Il fine ultimo è quello di innalzare il livello di base di resistenza di

una pianta in modo da renderla più resistente non solo a stimoli biotici, ma anche a stimoli abiotici come le drastiche variazioni climatiche a cui stiamo velocemente andando incontro. Ricordiamo infatti che a livello molecolare le vie di difesa innescate sia da stimoli biotici che abiotici convergono su pochi, specifici mediatori come le MAPK e l' H_2O_2 che la CP è proprio in grado di innescare un'over-produzione di questi mediatori.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia sentitamente tutti coloro che hanno contribuito alla realizzazione degli esperimenti rendendo possibile la presentazione di questa relazione. Un particolare ringraziamento va alla Dr. Priscilla Bettini, ricercatrice presso il Dipartimento di Biologia e ai PhD Simone Luti, Ivan Baccelli, Federica Martellini.

RIASSUNTO

Le piante sono in grado di difendersi da stimoli esterni (biotici e abiotici) innescando una serie di risposte di difesa che portano alla produzione di molecole antimicrobiche (come le fitoalessine), al rafforzamento della parete vegetale e alla produzione di una vasta gamma di peptidi e proteine di difesa. La percezione di un elicitore porta, inoltre, ad innalzare il livello di resistenza della pianta contro attacchi futuri. Importante peculiarità di questi meccanismi di difesa è la somiglianza tra quelli indotti da stimoli biotici e quelli dovuti a stimoli abiotici per una comunanza di mediatori di difesa intracellulari. Recenti linee di ricerca indicano un aumento di risposte di difesa in piante acclimatate o trattate con patogeni e viceversa, suggerendo la possibilità di poter migliorare la resistenza allo stress idrico in piante trattate con elicitori. La cerato-platanina, una proteina di origine fungina, si è rivelata agire da elicitore generale che attiva risposte di difesa in piante e induce resistenza contro *Botrytis* e *Pseudomonas*. Si propone quindi l'uso di questa proteina al fine di innalzare il livello di base di resistenza di una pianta in modo da renderla più resistente non solo a stimoli biotici, ma anche a stimoli abiotici come la siccità e le drastiche variazioni climatiche a cui stiamo velocemente andando incontro.

ABSTRACT

In the course of evolution, terrestrial plants have acquired the ability to detect the presence of potentially pathogenic microorganisms with which they come in contact. When plants recognize microbe-associated molecular patterns (MAMPs), they activate a defence system that is highly effective against the most potential pathogens. At molecular

level, this defence system is due to the activation of metabolic pathways that are similar to those activated as a result of an abiotic stimuli. Recent findings suggest a cross-talk between the defence responses activated by biotic and abiotic stimuli, and it has been noticed that acclimation of plants with an abiotic stress can impart tolerance to some biotic stresses and *vice versa*. In this respect, the fungal MAMP cerato-platanin, a low molecular weight non-catalytic protein, could be used in the treatment of plants and crops to increase their resistance to abiotic stimuli like drought. In fact, cerato-platanin is able to induce defences in plants such as the production of reactive oxygen species, the signaling of MAP kinases and the overexpression of genes related to the defence and it is able to induce resistance to *Botrytis* e *Pseudomonas*.

BIBLIOGRAFIA

- AHUJA I., KISSEN R., BONES A.M. (2012): *Phytoalexins in defense against pathogens*, «Trends Plant Science», 17, pp. 73-90.
- BACCELLI I., LUTI S., BERNARDI R., SCALA A., AND PAZZAGLI L. (2013a): *Cerato-platanin shows expansin-like activity on cellulosic materials*, «Applied Microbiology and Biotechnology», 98, pp. 175-184.
- BACCELLI I., SCALA A., PAZZAGLI L. AND BERNARDI R. (2013b): *Early transcription of defence-related genes in Platanus × acerifolia leaves following treatment with cerato-platanin*, «Biologia Plantarum», 3, pp. 571-575.
- BAXTER A., MITTLER R., SUZUKI N. (2013): *ROS as key players in plant stress signalling*, «Journal Experimental Botany», doi: 10.1093/jxb/ert375.
- DE OLIVEIRA A.L., GALLO M., PAZZAGLI L., BENEDETTI C.E., CAPPUGI G., SCALA A., PANTERA B., SPISNI A., PERTINHEZ T.A., CICERO D.O. (2011): *The structure of the elicitor cerato-platanin (CP), the first member of the CP fungal protein family, reveals a double- ψ -barrel fold and carbohydrate binding*, «Journal of Biological Chemistry», 286, pp. 17560-17568.
- HANAFY M.S., EL-BANNA A., SCHUMACHER H.M., JACOBSEN H.J., HASSAN F.S. (2013): *Enhanced tolerance to drought and salt stresses in transgenic faba bean (Vicia faba L.) plants by heterologous expression of the PR10 a gene from potato*, «Plant Cell Reports», 32, pp. 663-674.
- KAR R.K. (2013): *Plant responses to water stress: Role of reactive oxygen species*, «Plant Signaling & Behavior», 6, pp. 1741-1745.
- KRISHNAMURTHY A., RATHINASABAPATHI B. (2013): *Oxidative stress tolerance in plants: novel interplay between auxin and reactive oxygen species signaling*, «Plant Signaling & Behavior», 8, doi: 10.4161/psb.25761.
- LOMBARDI L., FAORO F., LUTI S., BACCELLI I., MARTELLINI F., BERNARDI R., PICCIARELLI P., SCALA A. AND PAZZAGLI L. (2013): *Differential timing of defense-related responses induced by cerato-platanin and cerato-populin, two non-catalytic fungal elicitors*, «Physiologia Plantarum», 149, pp. 408-421.
- NEWMAN M.A., SUNDELIN T., NIELSEN J.T., ERBS G. (2013): *MAMP (microbe-associated molecular pattern) triggered immunity in plants*, «Frontiers in Plant Science», 4, pp. 1-14.
- PAZZAGLI L., CAPPUGI G., MANAO G., CAMICI G., SANTINI A., SCALA A. (1999): *Purification, characterization, and amino acid sequence of cerato-platanin, a new phytotoxic*

- protein from Ceratocystis fimbriata f. sp. platani*, «Journal of Biological Chemistry», 274, pp. 24959-24964.
- PAZZAGLI L., PANTERA B., CARRESI L., ZOPPI C., PERTINHEZ T.A., SPISNI A., TEGLI S., SCALA A., CAPPUGI G. (2006): *Cerato-Platanin, the First Member of a New Fungal Protein Family: Cloning, Expression, and Characterization*, «Cell Biochemistry and Biophysics», 44, pp. 512-521.
- PAZZAGLI L., SEIDL-SEIBOTH V., BARSOTTINI M., VARGAS W.A., SCALA A., PRASUN K., MUKHERJEE P.K. (2014): *Cerato-platanins: elicitors and effectors*, «Plant Science», *in press*.
- PITERKOVÁ J., LUHOVÁ L., MIESLEROVÁ B., LEBEDA A., PETŘIVÁLSKÝ M. (2013): *Nitric oxide and reactive oxygen species regulate the accumulation of heat shock proteins in tomato leaves in response to heat shock and pathogen infection*, «Plant Science», 207, pp. 57-65.
- RAFIQI M., ELLIS J.G., LUDOWICI V.A., HARDHAM A.R., DODDS P.N. (2012): *Challenges and progress towards understanding the role of effectors in plant-fungal interactions*, «Current Opinion in Plant Biology», 15, pp. 477-482.
- RAMEGOWDA V., SENTHIL-KUMAR M., ISHIGA Y., KAUNDAL A., UDAYAKUMAR M., MYSORE K.S. (2013): *Drought Stress Acclimation Imparts Tolerance to Sclerotinia sclerotiorum and Pseudomonas syringae in Nicotiana benthamiana*, «International Journal of Molecular Sciences», 14, pp. 9497-9513.
- SCALA A., PAZZAGLI L., COMPARINI C., SANTINI A., TEGLI S., CAPPUGI G. (2004): *Cerato-platanin, an early produced protein by Ceratocystis fimbriata f.sp. platani, elicits phytoalexins synthesis in host and non-host plants*, «Journal of Plant Pathology», 86, pp. 23-29.

Risorse idriche e salute delle piante

INTRODUZIONE

L'acqua è molecola indispensabile alla vita. Non esiste nella biosfera essere vivente che ne possa fare a meno: dalle più semplici forme unicellulari agli organismi multicellulari più evoluti, tutti necessitano di acqua per lo svolgimento delle proprie funzioni vitali.

L'acqua è di per sé indice di vita. Non a caso, obiettivo primario di ogni programma di esplorazione spaziale è la ricerca di tracce di tale prezioso elemento. Il rinvenimento di acqua costituirebbe infatti un segnale fondamentale dell'esistenza di forme di vita aliene.

L'acqua ha giocato un ruolo cruciale nello sviluppo della stessa civiltà umana. Le civiltà più evolute dell'antichità si svilupparono in Mesopotamia (dal greco Μεσοποταμία = *in mezzo ai fiumi*), fascia di territorio compresa, per l'appunto, tra due importanti fiumi, il Tigri e l'Eufrate, che la resero l'area più florida e ospitale del Medio Oriente e del mondo conosciuto dell'epoca. Le risorse idriche hanno sempre, del resto, rivestito per l'uomo importanza capitale, tanto da essere state nel corso dei secoli motivo di aspre contese. La *guerra dell'acqua* è in effetti uno dei conflitti storicamente più ricorrenti tra popoli, tribù, gruppi etnici. Oggi il problema è più che mai attuale, e anzi è viepiù esacerbato dagli effetti, in alcune aree del Pianeta devastanti, del *Climate Change* (De Wit e Stankiewicz, 2006). Secondo le Nazioni Unite, è altamente realistico il rischio che nel XXI secolo scoppino delle guerre per l'approvvigionamento di questa ri-

* Dipartimento di Scienze delle Produzioni Agroalimentari e dell'Ambiente (DISPAA), Sezione di Patologia vegetale ed Entomologia, Università di Firenze

sorsa, la cui carenza si sta drammaticamente aggravando a livello planetario (Barnaby, 2009).

L'acqua è il principale componente del protoplasma, quindi elemento costitutivo essenziale dei tessuti vegetali. In condizioni di carenza di acqua, le cellule e gli organi della pianta perdono turgore e consistenza meccanica e il vegetale va incontro a profonde alterazioni delle proprie strutture e funzioni. L'acqua interviene altresì nelle piante come solvente, consentendo il passaggio di gas e soluti attraverso cellule e organi, e come reagente. Processi fondamentali, quali la fotosintesi, gli scambi gassosi, l'assorbimento e il trasporto degli elementi nutritivi, la divisione e la distensione cellulare, varie reazioni enzimatiche, dipendono dalla disponibilità di acqua. Le sostanze elaborate con il processo fotosintetico nelle foglie sono traslocate al resto della pianta attraverso la soluzione acquosa circolante. È grazie all'acqua dispersa mediante il processo di evapotraspirazione che le parti aeree dei vegetali non si surriscaldano eccessivamente quando l'insolazione e la temperatura dell'aria diventano elevate (Araya, 2007).

L'acqua è dunque elemento indispensabile alla vita delle piante, di cui regola sviluppo e benessere generale. Recita un antico detto contadino: *senza l'acqua non cresce il grano*. Chi si occupa di coltivazioni, siano esse a cielo aperto o protette, intensive o estensive, sa bene che la indisponibilità di detta risorsa è uno dei maggiori fattori di decurtazione della produzione. Nella pianura padana, ad es., la coltivazione di mais in assenza di irrigazione ha una resa produttiva pari a circa un terzo della coltura irrigua (Nazzareno e Olivero, 1986).

Analizzare l'impatto del parametro idrico sulla salute delle piante non è semplice. L'acqua è un determinante fondamentale della funzionalità dei sistemi biologici, entro cui agisce a vari livelli gerarchici, dall'ecosistema alla singola cellula. Nelle produzioni agro-forestali la problematica è vasta e variegata, perché ricorre in una pluralità di sistemi, da quelli più complessi, come le biocenosi naturali, a quelli più semplificati, come le colture idroponiche. In mezzo troviamo una gamma di metodi colturali che fanno della risorsa idrica un uso diversificato e da questa sono diversamente condizionati.

L'argomento è dunque impegnativo. Per affrontarlo in maniera appropriata – senza avere tuttavia pretese di esaustività – è opportuno considerare in quali e quanti modi questa preziosa risorsa influenzi la salute delle piante e, di rimando, la produttività delle colture. L'acqua può limitare la salute delle piante in relazione: alla *forma* con cui si manifesta in natura (pioggia, neve, grandine, ecc.); alla sua *disponibilità* o *indisponibilità* (eccessi o carenze idriche); alla sua *influenza*, in positivo o in negativo, sul ciclo vitale dei vegetali

e dei loro parassiti, e sulle interazioni che avvengono tra questi due gruppi di organismi; alla *funzione*, talvolta destabilizzante, che viene ad assumere in determinati agroecosistemi (ad es. come vettore di agenti fitopatogeni o come fattore di stress). Appare dunque evidente come l'impatto dell'acqua sulla sanità dei vegetali sia da ricondurre a fattori molteplici ed eterogenei che, per necessità di schematizzazione, possiamo distinguere in due categorie principali:

- fattori idro-meteorologici: origine e natura delle acque; andamento e tipo di precipitazioni;
- fattori bio-epidemiologici: alterazione della fenologia e della fisiologia dell'ospite; modulazione del ciclo vitale dei parassiti (produzione, liberazione, dispersione, conservazione dell'inoculo); condizionamento del processo infettivo e dell'intero processo patogenetico.

DANNI CONNESSI CON LA NATURA FISICO-CHIMICA DELL'ACQUA

L'acqua è l'unica sostanza che si trovi in natura nei tre stati di aggregazione: solido, liquido e gassoso. Allo stato solido essa si manifesta sotto forma di ghiaccio, neve, grandine, galaverna, brina; allo stato liquido la rinveniamo sotto forma di pioggia e rugiada; allo stato gassoso è presente come nebbia e vapore. Eccessi o difetti di pressoché ciascuno di tali stati sono causa, diretta o indiretta, di danno e malattia nelle piante.

Oltre che in relazione al suo stato, l'acqua può condizionare la salute delle piante in base alle *qualità, temperatura, forma, quantità e intensità* con cui essa si manifesta.

La qualità dell'acqua dipende dalla sua composizione chimica. Questa è determinata da una serie di caratteristiche quali la reazione chimica (pH); la durezza (ricchezza in sali di calcio e magnesio); la salinità (eccesso di ioni Na^+ e Cl^-); il contenuto in cloruri, solfati, carbonati e bicarbonati; la dotazione di microelementi quali ferro, boro, rame, manganese e zinco (Ayers e Wescott, 1989).

Anomalie nella qualità dell'acqua, quali eccessi o carenze di alcuni elementi o composti, o una sproporzione tra essi (ad es. nel rapporto tra calcio, sodio e magnesio), possono causare alle piante danni di vario tipo, diretti e indiretti. Tra i danni diretti ricordiamo: fitotossicità; scompensi nutrizionali (legati a una ridotta capacità di assorbimento di elementi nutritivi dal terreno); difficoltà nell'assunzione della stessa acqua (ciò si verifica, ad es., nei terreni eccessivamente salini). Tra i danni indiretti: alterazione della struttura

del terreno; aumento della suscettibilità delle piante alle fitopatie (ad es. alle fusariosi); accresciute produzione di inoculo e virulenza degli stessi agenti parassitari (Broggio et al., 1995).

La temperatura dell'acqua, se inadeguata, può provocare danni alle piante. I palmiferi, ad es., sono molto sensibili all'acqua fredda, che causa disseccamenti di porzioni del lembo fogliare, tanto più estesi quanto maggiore è il tempo di somministrazione. Il danno è da porre anche in relazione alla sensibilità specifica e varietale.

AVVERSITÀ METEORICHE

Fra le più dannose idrometeorie è da menzionare sicuramente la grandine. I danni sono più gravi a carico delle colture pluriennali, ripercuotendosi gli effetti per più anni. I chicchi di grandine causano cascole di foglie, fiori e frutti, nonché lesioni a gemme e tegumenti esterni della pianta (fig. 1). Tali ferite costituiscono, tra l'altro, vie preferenziali di ingresso per una gamma di patogeni opportunisti, che utilizzano le soluzioni di continuità prodotte dall'azione meccanica della grandine per penetrare all'interno dell'ospite e causare malattia (Slippers e Wingfield, 2007). La dannosità di questa avversità è tale da giustificare, per le colture ad alto reddito, l'attuazione della difesa antigrandine.

La neve provoca danni essenzialmente di tipo meccanico, quali stroncamenti di porzioni di chioma o di intere piante. I danni sono maggiori sulle sempreverdi, trattenendo le foglie buona parte della neve che vi si deposita sopra, con aumento del peso e facilità di rottura di rami e branche; e, ovviamente, sulle specie il cui legno è poco resistente al carico nevoso (Nykänen et al., 1997). Una vera calamità sono le nevicate autunnali precoci e quelle tardive primaverili. Le prime possono avere effetti catastrofici sui fruttiferi a maturazione invernale, come ad es. su alcuni agrumi (arancio, mandarino, clementine e pompelmo), se si verificano prima della raccolta. Su tali piante, già gravate dal peso dei frutti, le precipitazioni nevose possono rivelarsi un vero flagello, provocando pesanti stroncature di rami e branche che sfigurano la pianta lasciando a volte in piedi, in caso di nevicate abbondanti, il solo asse centrale.

Gli abbassamenti repentini di temperatura, generalmente notturni, trasformano l'acqua in ghiaccio, provocando le gelate. I danni da gelo variano a seconda dell'epoca in cui si manifestano (il danno è in relazione allo stato vegetativo della pianta); dell'intensità dell'evento; delle porzioni di pianta

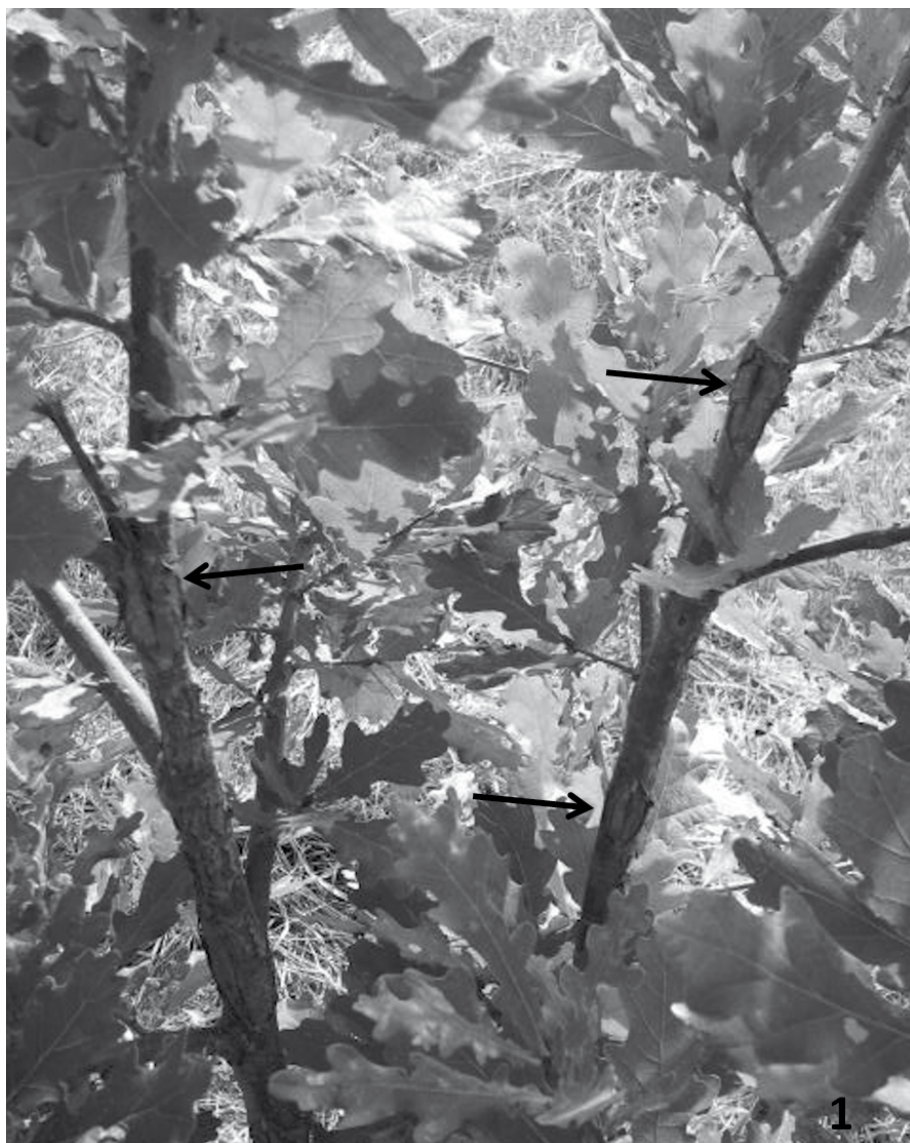


Fig. 1 *Giovane pianta di quercia con evidenti lesioni (freccie) sul ritidoma provocate dalla grandine*

colpite (epigee e/o ipogee); degli organi interessati (gemme, organi legnosi o carnosì). In tardo autunno si possono avere gelate precoci, le cui conseguenze sono tanto più gravi quanto più l'entrata in riposo delle piante è ritardata. Le gelate primaverili o tardive possono avere effetti disastrosi sulle piante già

in fase vegetativa. Organi quali fiori e frutticini, in fase di intenso sviluppo, con tessuti succulenti e ricchi di acqua, sono estremamente sensibili al gelo e possono risultare uccisi o lesionati, con fenomeni di partenocarpia e cascola (Rodrigo, 2000). A carico dei tessuti legnosi si possono formare vescichette corticali, cretti da gelo, spaccature (a becco di luccio), cipollature. Sulle foglie sono frequenti scollamenti dell'epidermide, bollosità, necrosi, striature, sfrangiature, lacinature. I geli tardivi sono una vera calamità per i cereali, cui possono causare clorosi e aborto, totale o parziale, della spiga.

I danni appena descritti sono per lo più dovuti al congelamento dell'acqua entro le cellule e i tessuti della pianta. Esternamente a essa, il congelamento dell'acqua libera (di condensazione, di pioggia o derivante dal disgelo della neve) determina la formazione di uno strato di ghiaccio sugli organi legnosi aerei, spesso anche diversi centimetri, che va sotto il nome di galaverna. I manicotti di ghiaccio possono avvolgere interamente rami e tronchi al punto che la pianta appare come vetrificata e va soggetta a stroncatura al minimo scuotimento.

La brina si forma per congelamento della rugiada o sublimazione del vapore acqueo sulla superficie delle piante a causa dell'irraggiamento notturno. Le brinate sono dannose soprattutto sui giovani germogli, sulle gemme appena dischiuse, sui tessuti erbacei. Il danno può variare da lievi imbrunimenti delle parti esterne delle foglioline e degli abbozzi florali a imbrunimenti dell'intero organo colpito. Nei casi più gravi, gli organi erbacei perdono turgidità e presentano la cosiddetta "allessatura" (Siviero e Bergamini, 2001).

Alterazioni da eccessi idrici

Il manifestarsi di determinate fitopatie in un dato comprensorio è da porre in stretta relazione con l'ammontare e la distribuzione delle piogge. Molti modelli previsionali sullo sviluppo di specifiche malattie – quali le botriti e gli oidi (di una varietà di colture), la ticchiolatura (del melo, del pero, del nespolo), la peronospora (del pomodoro, della patata, della vite), il fuoco batterico delle Pomacee – prendono in considerazione, come parametro fondamentale, la quantità e la durata delle precipitazioni. Sia l'incidenza che la severità di tali malattie dipendono dunque dagli eventi meteorologici, in primo luogo dall'andamento della piovosità e dalle condizioni di umidità relativa dell'aria in precisi periodi e stagioni dell'anno (Agrios, 2005).

Le piogge intense e prolungate causano allagamenti e ristagni idrici. L'elevata umidità del suolo può essere causa di danni significativi alle radici.

Sebbene i vegetali variino nella loro sensibilità ai cambiamenti nella quantità di umidità del suolo, tutti necessitano di terreno ben aerato. Un eccesso di umidità, che blocchi o riduca la porosità del suolo, crea condizioni di anossia. Metaboliti tossici possono accumularsi nelle radici e danneggiarle. La sommersione del terreno per un periodo di tempo prolungato comporta altresì riduzione nell'assunzione di acqua e di elementi nutritivi, per cui le piante evidenziano sintomi da carenza indotta e appaiono clorotiche. In tali condizioni, le piante possono presentare lenticelle ingigantite nella porzione basale del fusto. Radici avventizie possono altresì svilupparsi in prossimità della superficie del terreno, ove vi è maggiore aerazione, mentre le radici più profonde imbruniscono e necrotizzano (Schoeneweiss, 1975). Vi è dunque uno stretto rapporto di causalità tra inondazione del terreno, asfissia radicale e intristimento generalizzato della vegetazione.

Nei suoli saturi d'acqua, oltre al danno diretto (necrosi e morte delle radici) alle piante per le condizioni di asfissia del terreno, se ne può verificare un altro, indiretto, di cui è comunque responsabile l'acqua. Molte piante presentano radici necrotiche e muoiono per le infezioni di pericolosi agenti di marciume radicale, che si fanno veicolare dall'acqua che si muove nel terreno, o di altri patogeni tellurici, la cui attivazione e infettività è condizionata dal mezzo acquoso.

Gli oomiceti (o pseudofunghi) delle famiglie delle *Peronosporaceae* e delle *Pythiaceae* (fra cui importanti membri dei generi *Phytophthora*, *Plasmopara* e *Pythium*) sono fra i parassiti più dannosi. Le *Phytophthorae*, che nei Paesi di lingua anglosassone sono chiamate, per via della loro predilezione per gli ambienti acquatici, *water moulds* (= muffe d'acqua), si trovano a proprio agio, per l'appunto, negli ambienti umidi; nelle formazioni boschive percorse da corsi d'acqua; nelle bassure ove si verifichino ristagni idrici; ovunque – in altri termini – vi sia eccesso di acqua. Tali parassiti, dotati di zoospore con flagelli mobili, si muovono in tali contesti con grande facilità, oppure si lasciano trasportare passivamente dall'acqua di scorrimento superficiale o di percolazione nel terreno, fino a raggiungere le radici fini delle piante, ove ha inizio il processo infettivo che culmina con la distruzione pressoché totale dell'apparato radicale.

Una delle più devastanti morie dell'Eucalipto in Australia, denominata *Jarrah dieback*, causata dall'oomicete *Phytophthora cinnamomi*, è favorita dalle periodiche inondazioni di vaste aree del continente australiano. Questa specie, polifaga e cosmopolita, ha recentemente causato elevata mortalità su piante di sughera in Sardegna (Scanu et al., 2013). L'accumulo e lo scorrimento, sia superficiale che sotterraneo, di acqua, e la saturazione del terreno



Fig. 2 Foglia di *Viburnum tinus* con caratteristiche macchie brune, di forma irregolare, causate dall'infezione di *Phytophthora ramorum*

Fig. 3 Getti di *Viburnum tinus* tipicamente ripiegati a uncino e in via di disseccamento per effetto dell'infezione di *P. ramorum*

per lunghi periodi di tempo, facilitano il movimento sia attivo che passivo di questo temibile parassita, che porta rapidamente a morte le piante infette (Shea et al., 1984).

Altro pericoloso oomicete che si trova a suo agio nel mezzo idrico è *Phytophthora ramorum*, patogeno da quarantena incluso nella A2 List della EPPO (*European and Mediterranean Plant Protection Organization*). Questo agente, che ha un ampio spettro di specie ospiti arboree e arbustive, ha causato la morte di vaste formazioni naturali di *Lithocarpus densiflorus* e *Quercus* spp. in California, guadagnandosi l'appellativo di agente del "SOD" (*Sudden Oak Death* = *Morte Improvvisa delle Querce*) (Rizzo et al. 2002). Il patogeno si è poi diffuso nelle foreste naturali della California e dell'Oregon, dove ha infettato numerose specie legnose e arbustive. In Europa, esso sta devastando attualmente vasti impianti artificiali di Larice giapponese nel Regno Unito (Webber et al., 2010). Il parassita è stato purtroppo rinvenuto di recente anche nel nostro Paese, in alcuni vivai del pistoiese, su piante di *Viburnum tinus* allevate in vaso (Ginetti et al., 2014). I sintomi più evidenti sono: macchie fogliari irregolari di colore bruno (fig. 2), necrosi del fusto, ripiegamento a uncino dei getti terminali (fig. 3). È superfluo sottolineare come l'acqua, che in ambito vivaistico non è mai lesinata, e l'import/export di materiale vegetale, siano fra le cause di diffusione del patogeno. Forte è l'apprensione fra gli operatori del settore (vivaisti e personale dei servizi fitosanitari) per il timore che il parassita comprometta la fiorente attività vivaistica del comprensorio. Il rischio è altresì che *P. ramorum* possa diffondersi epidemicamente nell'ambiente naturale, al pari di quanto è già avvenuto in altri Paesi.

Varie altre *Phytophthorae* si muovono con facilità negli ambienti acquatici e nei terreni saturi d'acqua, causando estese morie nei sistemi naturali come nelle coltivazioni protette. Elencarle tutte sarebbe un esercizio dispendioso e comunque incompleto. Fra le specie più pericolose ricordiamo: *P. acerina*, *P. alni*, *P. cactorum*, *P. cambivora*, *P. citricola*, *P. citrophthora*, *P. cryptogea*, *P. kernoviae*, *P. lateralis*, *P. megasperma*, *P. plurivora* (Vettraino et al., 2002). Alcuni taxa sono particolarmente diffusi negli ambienti lacustri e ripariali (ad es. *P. alni* e *P. lacustris*), nelle formazioni boschive, nei parchi urbani ricchi di acqua (ad es. *P. acerina*), ove creano non pochi problemi nella gestione, sia sanitaria che selvicolturale, dei popolamenti (Ginetti et al., 2013).

I sintomi indotti dalle *Phytophthorae* sono tutt'altro che univoci e possono talvolta indurre a diagnosi errate. Essi sono infatti in parte aspecifici (microfillia, sviluppo stentato, trasparenza della chioma, abscissione prematura delle foglie, disseccamento delle branche, intristimento generalizzato) e confondibili talvolta con la sofferenza da stress idrico. Può in effetti capitare che piante



Fig. 4 Pianta di *Acer pseudoplatanus* in un parco urbano con vistosi disseccamenti della chioma. Pur vegetando su un terreno saturo di acqua, le piante mostrano sintomi da stress idrico; il motivo è da ricondurre alla loro incapacità di assumere acqua, avendo l'apparato radicale distrutto dalle infezioni di *Phytophthora acerina*

infette da tali oomiceti mostrino paradossalmente, pur vegetando in terreni ricchi di acqua, sintomi da carenza idrica (fig. 4). In realtà, il sintomo da deficit idrico è da ascrivere all'incapacità delle piante di assumere acqua, avendo il capillizio radicale distrutto dall'infezione (Thomas Jung, comunicazione personale).

Le aree contaminate da agenti del genere *Phytophthora* sono non di rado soggette a rigorose restrizioni (norme di quarantena). Una misura frequente è l'interdizione di qualunque tipo di accesso a uomini, mezzi e animali. Il motivo è perché particelle di terreno infetto potrebbero rimanere attaccate alle calzature e agli indumenti dei frequentatori, alle zampe degli animali (sia domestici che selvatici), agli pneumatici dei veicoli, e diffondere i patogeni al di fuori dalle aree infette, vanificando ogni sforzo volto a circoscrivere la malattia. Negli USA, nel tentativo di contrastare la diffusione epidemica di *P. lateralis*, temibile parassita di varie specie di *Chamaecyparis*, si è proceduto a identificare e mappare i siti a basso rischio infettivo, idonei perciò alla coltura

di tali conifere. Essi devono essere ben drenati, protetti dal pascolo e dalle attività umane, lontani da strade o sentieri (ben si prestano, allo scopo, le sommità delle colline). Una volta individuato un sito idoneo, si costruiscono tutt'intorno delle trincee circolari, che hanno lo scopo di raccogliere e allontanare le acque provenienti dall'esterno, impedendo che confluiscano nel sito dell'impianto (Hansen et al., 2000).

I membri del genere *Pythium* sono anch'essi connaturati con l'ambiente acquatico e si rinvencono con elevata frequenza negli impianti di irrigazione (Bush et al., 2003). Alcuni taxa sono noti per la loro virulenza, mentre altri sembrano essere patogeni di debolezza o saprofiti. Le difficoltà a identificare gli isolati di *Pythium* a livello di specie hanno spesso indotto a riportarne la presenza al solo livello di genere. Ciò ha causato una sottostima del reale numero di specie esistenti e una ridotta conoscenza del ruolo patogenetico di molti taxa (Hong e Moorman, 2005). Fra le specie accertate come patogene sono da annoverare *P. aphanidermatum*, *P. debaryanum*, *P. irregolare*, *P. oligandrum*, *P. perniciusum*, *P. splendens* e *P. ultimum* (Moorman et al., 2002).

Oltre alle *Phytophthorae* e ai *Pythium*, le cui zoospore mobili testimoniano l'evoluzione di questi organismi negli ambienti acquatici, vari agenti fungini risultano associati ai sistemi idrici (Vannini e Vettrano, 2006).

Tecniche di isolamento in coltura e basate sul rilievo del DNA hanno rivelato la presenza di specie dei generi *Chetomium*, *Curvularia*, *Diplodia*, *Fusarium*, *Gliocladium*, *Phoma*, *Rhizoctonia*, *Sclerotium* e *Verticillium* nelle acque di irrigazione (Cooke, 1956; Thomson e Allen, 1974; Lievens et al., 2003). Molti di tali funghi sono noti in ambito vivaistico come agenti del *damping-off*, o della *moria dei semenzali*. Trattasi di un gruppo di parassiti non ospite-specifici, che risiedono nel terreno o sul seme infetto, ma che possono essere presenti, sia pure transitoriamente, nelle acque di irrigazione. Essi inducono mortalità in pre- e post-emergenza e possono causare fallanze talvolta davvero significative. L'eccesso di umidità nel terreno e nell'aria in prossimità del suolo (sopra i letti di semina), quale si genera ad es. con l'irrigazione per nebulizzazione, sono fra i fattori predisponenti le infezioni di questi microorganismi. Altre specie fungine, come *Alternaria* sp., *Botrytis* sp. e *Ascochyta* sp. si trovano occasionalmente nelle acque. Il rinvenimento di tali microorganismi è però da porre in relazione con la loro abbondanza in natura, in quanto non sembrerebbero sopravvivere nei sistemi idrici (Shokes e McCarter, 1976). È stato invece provato che *Colletotrichum* sp. si diffonde efficacemente attraverso l'acqua in colture idroponiche di pomodoro (Jenkins e Averre, 1983).

Esistono evidenze sperimentali della presenza di batteri nelle acque di irrigazione. Alcune specie sono ritenute normali residenti degli ecosistemi ac-

quatici, mentre la presenza di altre è considerata transitoria (Cother e Gilbert, 1990). Il genere *Erwinia*, con *Erwinia carotovora* pv. *atroseptica*, *E. carotovora* pv. *carotovora*, *E. carotovora* pv. *zea* ed *E. chrysanthemi*, è quello rinvenuto con maggiore frequenza (McCarter-Zorner et al., 1984; Eayre et al., 1995). Anche i batteri dei generi *Xanthomonas* (Steadman et al., 1975) e *Corynebacterium* (Schuster, 1959) sono frequentemente associati alle acque di irrigazione. Sistemi di ricircolo dell'acqua e sistemi idroponici sono risultati ospitare *Ralstonia solanacearum* (Jenkins e Averre, 1983). *Xanthomonas campestris* pv. *begonia* ha mostrato di diffondersi con facilità nei sistemi di irrigazione per allagamento (Hoitink et al., 1991). Membri del genere *Corynebacterium* rimangono biologicamente attivi nelle soluzioni nutritive di ricircolo per circa un mese (Kegler et al., 1982).

La letteratura riporta il rinvenimento di circa una decina di virus in specchi e corsi d'acqua, come pure nelle acque di irrigazione (Hong e Moorman, 2005). Il PFBV (*Pelargonium Flower Break Virus*) è fra i più persistenti nei sistemi di ricircolo dell'acqua in serra (Berkelmann et al., 1995). È qui opportuno sottolineare che i virus nei corpi idrici sono ritenuti presenze temporanee. Il TMV (*Tomato Mosaic Virus*) è stato però rinvenuto fino a circa 72 ore in sistemi di ricircolo delle soluzioni nutritive (Pares et al., 1992).

I nematodi fitoparassiti sono comuni residenti del terreno e dei residui vegetali. È quindi plausibile ritrovarli anche nell'acqua di irrigazione riciclata (Petherbridge e Jones, 1944). Frequenti risultano essere le specie del genere *Heterodera*. La popolazione di tali parassiti può accrescersi numericamente in breve tempo se si utilizza acqua di irrigazione infestata. Pare tuttavia che i nematodi non sopravvivano a determinati sistemi di irrigazione. Ad es., negli impianti con pompaggio dell'acqua a pressione attraverso gli ugelli le fragili larve soccombono facilmente (Heald e Johnson, 1969).

Alterazioni da carenze idriche: l'acqua quale fattore di stress

La vita dei parassiti vegetali è modulata dal parametro idrico. L'acqua condiziona per intero il ciclo di tali microrganismi, dalla sopravvivenza allo sviluppo, dalla riproduzione (che consegue produzione di nuovo inoculo) alla dispersione delle spore.

La presenza di acqua, sulle superfici vegetali o nel suolo in prossimità delle radici, sotto varie forme (come pioggia, o acqua di irrigazione, o rugiada, o umidità relativa nell'aria), è fondamentale per l'inizio del processo infettivo (Agrios, 2005). Un velo d'acqua sulla superficie delle foglie è condizio-

ne indispensabile per la germinazione delle spore fungine e la penetrazione dell'ospite da parte dei tubetti germinativi (se non vi è sufficiente umidità i tubetti germinativi raggrinziscono e muoiono). Una certa umidità nel suolo è essenziale per l'attivazione dei patogeni batterici e fungini, come pure dei nematodi, affinché essi riescano a infettare la pianta. In assenza di acqua libera, o di umidità nel suolo, le strutture di conservazione (clamidospore) di molti patogeni rimangono dormienti. L'acqua, di pioggia o di irrigazione, battendo sulle superfici dei vegetali diffonde le spore dei patogeni sulla stessa pianta e da pianta a pianta: le gocce d'acqua che pervengono sulle lesioni sporulanti si caricano infatti di propaguli e, frazionate in goccioline più piccole, rimbalzano sulle superfici adiacenti, disseminando i patogeni e intensificando le malattie.

La longevità delle spore, la loro liberazione dagli sporofori, la quantità di biomassa prodotta dai patogeni dipendono dalla presenza di umidità. Il numero di cicli infettivi di molti patogeni nell'arco di una stagione vegetativa è determinato dalla disponibilità idrica. L'insorgenza e la severità di alcune malattie fungine sono strettamente correlate a tale parametro. L'agente della ticchiolatura del melo *Venturia inaequalis*, ad es., necessita, per causare infezione, di un tempo di bagnatura delle foglie e dei frutti di almeno 9 ore alla temperatura di 18-23°C. Se la temperatura si discosta da tale *range* sono necessari tempi di bagnatura maggiori (Agrios, 2005).

La dipendenza dei patogeni dall'acqua esterna diminuisce una volta che essi sono riusciti a penetrare all'interno della pianta, ove utilizzano l'acqua presente nell'apoplasto e nel simplasto. Alcuni di essi, tuttavia, come l'agente della peronospora della patata *Phytophthora infestans* e vari altri oomiceti, hanno bisogno di elevata umidità ambientale per l'intero loro ciclo vitale. In presenza di clima secco, lo sviluppo e la sporulazione di tali patogeni sono inibiti, per cui si registra un'attenuazione o un arresto della malattia.

Batteri e funghi fitopatogeni sono favoriti dall'acqua presente nei tessuti succulenti dei giovani germogli o nell'aria sotto forma di umidità relativa. I batteri penetrano le piante attraverso ferite e aperture naturali. Una volta all'interno, essi diventano più attivi e si moltiplicano con maggiore rapidità durante i periodi umidi.

Anche il ritmo biologico dei vegetali è scandito dalla risorsa idrica. Pressoché tutte le fasi fenologiche della pianta, dalla germinazione del seme alla apertura delle gemme, dalla fioritura alla maturazione dei frutti e alla caduta delle foglie, dipendono dall'acqua.

Allorché la domanda di acqua supera la disponibilità della risorsa idrica nel suolo la pianta va incontro a stress idrico. L'insufficienza idrica causa

varie alterazioni biochimiche, fisiologiche e morfo-anatomiche, che condizionano sviluppo e sopravvivenza del vegetale. Fra gli effetti più significativi ricordiamo: inibizione della crescita; della nutrizione minerale; del metabolismo dei carboidrati; del metabolismo azotato; del metabolismo ormonale; alterazione della permeabilità cellulare; alterazione della composizione chimica dei tessuti. La traspirazione, la fotosintesi, la respirazione, i processi idrolitici possono risultare gravemente compromessi, con perdita pressoché totale della loro funzionalità e danno irreversibile alla pianta (Matta e Penazio, 1984).

I normali processi fisiologici si discostano dal loro livello metabolico ottimale in relazione alla frequenza, intensità e durata dello stress idrico. La pianta può anche andare incontro a trasformazioni in senso xeromorfo, con le cellule della cuticola e dei tessuti interni che si presentano più piccole e con pareti ispessite, con aumento della tomentosità, con riduzione della taglia. Nei fruttiferi si riscontra una ridotta differenziazione delle gemme a fiore, fiori di dimensioni ridotte e poco colorati, caduta prematura di fiori e frutticini, ridotto sviluppo dei frutti rimanenti. Nel grano e in altri cereali si verifica il fenomeno della *stretta*, con sterilità parziale o totale dell'infiorescenza, o formazione di cariossidi scarne e rinsecchite (Nazzareno e Olivero, 1986).

Il danno da carenza idrica è generalmente graduale. Se il deficit è temporaneo, ad es. limitato alle ore più calde della giornata, quando maggiore è l'evapotraspirazione, si può avere appassimento temporaneo, con afflosciamento delle parti verdi, che recede con il calare della sera, quando si ripristinano le normali condizioni idriche. Se, invece, la carenza idrica è intensa e prolungata, si ha appassimento permanente (avvizzimento). Questo è un fenomeno irreversibile, perché causa deformazione e ripiegamento delle foglie verso il basso, perdita di peso dei frutti, morte degli organi più dispendiosi di acqua, quali le foglie mature e ben espanse, che iniziano a disseccare a partire dai margini.

Nelle specie legnose i sintomi più evidenti sono necrosi internodali, clorosi, disseccamento delle foglie a partire dall'apice, arrotolamento della lamina fogliare, senescenza prematura, ingiallimenti, filloptosi anticipata. Tali manifestazioni sono tipiche delle latifoglie, mentre nelle conifere predominano sintomi quali imbrunimento degli apici degli aghi, ingiallimento e caduta degli stessi, spaccature verticali o spirali del tronco. Con l'intensificarsi dell'evento stressorio si osserva un progressivo intristimento dell'albero, con branche che disseccano a partire dai getti terminali e deperimento generalizzato della chioma.

I danni da stress idrico nelle specie arboree sono da porre in relazione anche con la freschezza del terreno e la tolleranza individuale e specifica. Negli

ultimi decenni, tuttavia, anche specie eliofile, termofile e tendenzialmente xerofile – che generalmente prosperano nelle zone aride e in terreni ricchi di scheletro – hanno manifestato in alcune aree della Penisola sintomi evidenti di sofferenza (Moricca et al., 2012a).

Una conseguenza dello stress idrico, che può avere effetti letali, è l'aumento della suscettibilità delle piante alle infezioni parassitarie (Allen et al., 2010). Ciò perché il deficit idrico influenza l'interazione ospite-parassita, spostando il sottile equilibrio tra i partner dell'interazione a favore della componente microbica. I parassiti vegetali risultano favoriti in questa competizione di tipo antagonistico perché hanno maggiore capacità di adattamento alle variazioni ambientali, essendo dotati di ciclo vitale molto breve, grande capacità di riproduzione e dispersione, più elevata attitudine a modulare i propri processi fisiologici e metabolici in relazione alle variazioni di temperatura e umidità. Le piante, al contrario, in particolare le specie pluriennali, hanno un ciclo vitale lungo e una ridotta capacità di adattarsi alle brusche variazioni delle condizioni termo-igrometriche. È del resto acclarato che la siccità, uno degli effetti più devastanti del *Global Warming*, aumenta la vulnerabilità dei vegetali agli agenti parassitari, dei quali accresce, fra l'altro, *range* geografico, spettro degli ospiti, abbondanza e aggressività (Desprez-Loustau et al., 2007).

Studi di espressione genica hanno dimostrato che nelle piante, in presenza di stress multipli (abiotici e biotici), si ha un aumento dei trascritti che regolano la tolleranza alla siccità e una riduzione invece di quelli dei geni implicati nella resistenza ai patogeni. Questo spiegherebbe la maggiore suscettibilità delle piante indebolite dagli stress ambientali agli agenti parassitari (Chen et al., 2002).

I parassiti che più si avvantaggiano dello stato di debilitazione procurato alle piante dallo stress idrico sono i già menzionati patogeni opportunisti (Slippers e Wingfield, 2007). Trattasi di varie specie di funghi e batteri, definiti anche patogeni secondari, a sottolineare il fatto che essi non siano la causa primaria del danno. Le piante difatti generalmente recuperano dall'evento stressorio se esso è transitorio e dette entità microorganiche non sono presenti. Ne consegue che la sindrome da deperimento pur coincidendo a volte con stati di stress idrico, sia da ricondurre a una combinazione di fattori fisici (carenza idrica) e biologici (azione parassitaria) (Schoeneweiss, 1975).

I parassiti secondari sono definiti anche da ferita. Essi non sono in grado di infettare piante sane se queste non presentano lesioni da precedenti avversità abiotiche o biotiche. La carenza idrica causa all'epidermide e al ritidoma dei vegetali ferite quali cretti, spaccature e lacerazioni varie, che rappresentano una via d'ingresso per detti agenti. In condizioni normali, su piante in vigore, tali

microorganismi riescono a colonizzare soltanto le parti seccaginosi, e in tal senso svolgono anche una benefica azione saprofitaria, operando una potatura naturale dei rami senescenti o morti. Se la pianta è invece indebolita dalla insufficienza idrica, una volta penetrati al suo interno essi si diffondono pervasivamente, colonizzando aggressivamente anche i tessuti sani. Si portano infine sulle superfici esterne del vegetale, ove producono cancri e lesioni sporulanti, attraverso cui disperdono le loro spore nell'ambiente (Moricca e Ragazzi, 2008).

L'ascomicete *Biscogniauxia mediterranea*, agente del cosiddetto cancro carbonioso delle querce e di altre latifoglie arboree, utilizza una simile strategia di sopravvivenza (Ragazzi et al., 2012). Tale organismo, il cui areale fino alla fine del secolo scorso coincideva con le regioni del centro-sud Italia, ha di recente ampliato il proprio orizzonte superiore e ora lo si rinviene con facilità anche in pianura Padana. Le stagioni calde e siccitose dell'ultimo decennio avrebbero causato stress idrico alle piante favorendone la colonizzazione da parte di questo agente spiccatamente termofilo. La diffusione epidemica di tale parassita in aree incontaminate dimostra come il riscaldamento globale stia distruggendo le barriere biogeografiche naturali. Il processo causa l'omogeneizzazione dei biomi, creando condizioni favorevoli all'espansione di una gamma di parassiti verso zone a loro in precedenza inadatte (Moricca et al., 2008).

Comportamento analogo mostrano alcune *Botryosphaeriaceae*, altro pericoloso gruppo di patogeni opportunisti di specie agrarie e forestali. Agenti quali *Botryosphaeria dothidea*, *Diplodia seriata* e *Neofusicoccum parvum* sono in grado di sopravvivere come endofiti, in latenza, entro i tessuti delle piante per un periodo di tempo indefinito, senza causare sintomi apparenti. Possono però indurre sintomi anche molto gravi, quali cancri corticali, deperimento diffuso e mortalità, quando le piante vanno incontro a stress idrico, dopo un periodo di siccità significativa (Moricca et al., 2012b; Sakalidis et al., 2013).

CONCLUSIONI

Le coltivazioni agricole avvengono quasi per intero a cielo aperto (fanno eccezione le colture protette). Esse sono pertanto esposte ai fenomeni meteorici. Contro di essi, poco si può fare, tranne adottare misure particolari, come la difesa antigrandine, l'irrigazione antigelo, o l'impiego di modelli previsionali che facilitino le scelte colturali, aiutando a prevenire o eludere le avversità del clima.

Spesso, però, le idropatie sono la conseguenza di scelte agronomiche errate, come ad es. un utilizzo improprio della risorsa idrica. In tali casi,

opportuni accorgimenti possono consentire di evitare o limitare le perdite. Le tecniche irrigue, le pratiche colturali, le strategie di gestione dei sistemi agricoli e forestali sono infatti a volte la causa primaria del danno.

L'irrigazione a scorrimento e da solchi è pratica ancora largamente diffusa in ambito agrario per l'irrigazione dei fruttiferi. Tale metodo, oltre a causare spreco di acqua e condizioni di anossia per le radici, peggiora lo stato fitosanitario dell'appezzamento, perché porta gli agenti parassitari al suo interno (Mannini, 2006).

Nell'arboricoltura da legno, l'irrigazione per allagamento è largamente praticata per incrementare la produzione legnosa. Lo stesso stratagemma è attuato in modo crescente, laddove vi è disponibilità di acqua, nella forestazione urbana, allo scopo di alleviare la sofferenza causata alle piante dalla siccità estiva (Paola Pirelli, comunicazione personale). Un censimento della componente microbica fitoparassita di parcelle boscate irrigate per allagamento in un parco urbano della pianura milanese (Parco Boscoincittà) ha rivelato che la pratica può essere foriera di veri disastri ecologici. Se, da una parte, la somministrazione di acqua ha procurato un momentaneo sollievo ai popolamenti arborei, dall'altro ha portato loro la morte, perché pericolosi patogeni (varie specie di *Phytophthora*) sono stati introdotti nei terreni allagati. Tali agenti hanno causato negli anni successivi estese morie (Ginetti, 2013).

L'irrigazione per aspersione sopra chioma, in campo come in ambiente controllato, crea un ambiente saturo di umidità che favorisce lo sviluppo delle fitopatie; inoltre, come già ricordato, le gocce d'acqua, rimbalzando sulle superfici dei vegetali, diffondono i propaguli dei parassiti.

Nella microirrigazione a goccia, l'eccessivo umettamento del terreno produce elevata umidità nel sito di deposizione della goccia che favorisce gli agenti di marciume del colletto.

In vivaio, il particolare microclima, generato dalla copiosa somministrazione di acqua, e l'abbondanza di tessuti erbacei, favoriscono le *Phytophthorae*, i *Pythium* e gli altri agenti della moria dei semenzali.

Il problema è viepiù esacerbato nelle coltivazioni in serra il cui condizionamento è determinante per lo sviluppo delle fitopatie. L'ambiente caldo e umido, ma anche l'eccessiva densità, la contiguità spaziale fra letti di semina, bancali, ecc., favoriscono le malattie.

Le problematiche di cui sopra si risolvono solo con l'adozione di adeguate misure di igiene fitosanitaria. Quale che sia la tecnica irrigua impiegata, è necessario prestare attenzione alla profondità d'irrigazione: l'acqua deve raggiungere le radici, ma non saturare il terreno. Gli impianti di irrigazione devono essere ben funzionanti. Nell'irrigazione per aspersione o nebulizzazione,

bisogna evitare la formazione di eccessiva condensa sulle foglie e gli sgocciolamenti. Le estremità dei tubi di irrigazione devono essere tenute sospese. Se esse poggiano a terra, vanno periodicamente disinfettate. In serra è necessaria una buona circolazione dell'aria, per abbattere l'umidità relativa e ostacolare lo sviluppo di fitopatie (ad es. la botrite).

Abbiamo visto che vari taxa di parassiti vegetali si ritrovano comunemente nei corpi idrici, sia naturali che artificiali. Le *Phytophthorae* e i *Pythium* allignano in fiumi, canali, compluvi, ma anche in vasche di raccolta, pozzi, cisterne, ecc. È preferibile usare, se possibile, acqua corrente, ed evitare quella di stagni, vasche o altre riserve a cielo aperto. Ciò in quanto le acque di percolazione possono portare i parassiti dal terreno all'interno di tali sistemi di raccolta. Si deve altresì evitare il pompaggio dei sedimenti dal fondo dei serbatoi perché è alto il rischio che in essi vi siano agenti contaminanti. Il riciclo dell'acqua di irrigazione, legato alla necessità di economizzare detta risorsa, è in espansione e sta aumentando i problemi di contaminazione. Se si utilizza acqua riciclata, è buona norma controllarla periodicamente per la presenza di organismi nocivi. Sono oggi disponibili protocolli efficaci di sanificazione, quali la filtrazione, la soppressione biologica, la clorazione, l'irraggiamento mediante UV (Hong e Moorman, 2005).

La ricerca è fondamentale per il monitoraggio delle acque. Test accurati, rapidi e altamente sensibili (rilievo degli acidi nucleici) stanno consentendo di identificare una grande varietà di agenti fitopatogeni nei sistemi di irrigazione. È auspicabile che l'applicazione di detti metodi venga sempre più estesa, soprattutto laddove è utilizzata acqua riciclata.

Ma la ricerca non si deve limitare a rilevare la presenza dei patogeni oppure a misurarne la patogenicità. Essa deve spingersi oltre e studiarne l'ecologia. Tale approccio è fondamentale per capire se un determinato agente rinvenuto in un corpo idrico sia un passeggero momentaneo oppure se esso sia connaturato con quel dato habitat. È cioè importante giungere a comprendere perché alcuni agenti sono normali residenti dei sistemi idrici, altri sono in grado di prosperarvi per periodi più o meno lunghi e altri, infine, semplicemente vi passano attraverso. Tali acquisizioni sono basilari per l'implementazione di misure *ad hoc* di profilassi e di controllo fitosanitario.

RIASSUNTO

L'acqua è elemento costitutivo della cellula vegetale e microbica. Attraverso le sue singolari e complesse proprietà, essa regola funzioni e ritmi vitali di piante e parassiti vegetali. Risorsa indispensabile per tutte le colture, difetti nella sua disponibilità (eccessi o carenze

idriche) possono causare profonde alterazioni nella funzionalità dei sistemi agricoli e forestali. Gli squilibri idrici finiscono per indurre grave stress fisiologico nelle piante, compromettendone la sanità e la resa produttiva, nonché favorire la diffusione epidemica dei parassiti vegetali. Questo articolo, dopo una accurata disamina dei principali fattori che sono alla radice del problema, mette a fuoco le attuali lacune della ricerca e ne indica le prospettive future.

ABSTRACT

Water is a constitutive element of plant and microbial cells. With its singular and complex properties, water regulates the biological functions and rhythms of plants and plant parasites. Consequently, any lack or excess of this indispensable resource may cause profound changes in the functioning of agricultural and forest ecosystems. Water imbalances cause serious physiological stress in plants, impair plant health and yield, and favour the epidemic spread of parasites. This article examines the main factors causing water imbalances and discusses gaps in current research and prospects for the future.

BIBLIOGRAFIA

- AGRIOS G.N. (2005): *Plant Pathology*, Elsevier Academic Press, London, 5th ed.
- ARAYA Y.N. (2007): *Ecology of water relations in plants*, in *Encyclopaedia of Life Sciences*, Not Set ed.
- AYERS R.S., WESCOTT D.W. (1989): *Water quality for agriculture*, «FAO Irrig. Drain. Paper», 29, pp. 737-746.
- ALLEN C.D., MACALADY A.K., CHENCHOUNI H., BACHELET D., MCDOWELL N., VENNETIER M., KITZBERGER T., RIGLING A., BRESHEARS D.D., HOGGE H., GONZALEZ P., FENSHAM R., ZHANG Z., CASTRO J., DEMIDOVA N., LIM J.H., ALLARD G., RUNNING S.W., SEMERCI A., COBB N. (2010): *A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests*, «For. Ecol. Manage.», 259, pp. 660-684.
- BARNABY W. (2009): *Do nations go to war over water*, «Nature», 458, pp. 282-283.
- BERKELMANN B., WOHANKA W., KRCZAL G. (1995): *Transmission of Pelargonium flower break virus (PFBV) by recirculating nutrient solutions with and without slow sand filtration*, «Acta Hort.», 382, pp. 256-262.
- BROGGIO M., RAGAZZI A., SOLDI R., MORICCA S., DELLAVALLE I., SABATINI S. (1995): *The biometric response of the Fusarium oxysporum f. sp. vasinfectum isolate Biè from Angola to a Na₂SO₄ enriched medium*, in Proc. Int. Seminar 'FUSARIUM, Mycotoxins, Taxonomy and Pathogenicity', Martina Franca (Italy), May 9-13, pp. 211-212.
- BUSH, E.A., HONG, C.X., STROMBERG, E.L. (2003): *Fluctuations of Phytophthora and Pythium spp. in components of a recycling irrigation system*, «Plant Dis.», 87, pp. 1500-1506.
- CHEN W., PROVART N.J., GLAZE BROOK J., KATAGIRI F., CHANG H.S., EULGEM T., MAUCH F., LUAN S., ZOU G., WHITHAM S.A., BUDWORTH P.R., TAO Y., XIE Z., CHEN X., LAM S., KREPS J. A., J.F. HARPER, SI-AMMOUR A., MAUCH-MAN B., HEINLEIN M., KOBAYASHI K., HOHN T., DANGL J.L., WANG X., ZHU T. (2002): *Expression profile matrix of*

- Arabidopsis* transcription factor genes suggests their putative functions in response to environmental stresses, «Plant Cell», 14, pp. 559-574.
- COOKE W.B. (1956): *Potential plant pathogenic fungi in sewage and polluted water*, «Plant Dis.», Rep., 40, pp. 681-687.
- COTHER E.J., GILBERT R.L. (1990): *Presence of Erwinia chrysanthemi in two major river systems and their alpine sources in Australia*, «J. Appl. Bacteriol.», 69, pp. 729-738.
- DE WIT M., STANKIEWICZ J. (2006): *Change in Surface Water Supply Across Africa with Predicted Climate Change*, «Science 2006», 311, pp. 1917-1921.
- DESPREZ-LOUSTAU M., ROBIN C., REYNAUD G., DÉQUÉ M., BADEAU V., PIOUS D., HUSON C., MARÇAIS B. (2007): *Simulating the effects of a climate-change scenario on the geographical range and activity of forest-pathogenic fungi*, «Can. J. Plant Pathol.», 29, pp. 101-120.
- EAYRE C.G., BARTZ J.A., CONCELMO D.E. (1995): *Bacteriophages of Erwinia carotovora and Erwinia ananas isolated from freshwater lakes*, «Plant Dis.», 79, pp. 801-804.
- GINETTI B. (2013): *Identity, impact and role of Phytophthora species in planted forests of north Italy*, Tesi di dottorato di Ricerca in Biotecnologie Microbiche Agrarie, XXV ciclo (2010-2012).
- GINETTI B., CARMIGNANI S., RAGAZZI A., WERRES S., MORICCA S. (2014). *Foliar Blight and Shoot Dieback Caused by Phytophthora ramorum on Viburnum tinus in the Pistoia Area, Tuscany, Central Italy*, «Plant Dis.», 98, p. 423.
- GINETTI B., MORICCA S., SQUIRES, J.N., COOKE, D.E.L., RAGAZZI A., JUNG T. (2013): *Phytophthora acerina sp. nov., a new species causing bleeding cankers and dieback of Acer pseudoplatanus trees in planted forests in Northern Italy*, «Plant Pathol.», Doi: 10.1111/ppa.12153.
- HANSEN E.M., GOHEEN D.J., JULES E.S., ULLIAN B. (2000): *Managing Port-Orford cedar and the introduced pathogen Phytophthora lateralis*, «Plant Dis.», 84, pp. 4-13.
- HEALD C.M., JOHNSON A.W. (1969): *Survival and infectivity of nematodes after passing through an overhead sprinkler irrigation system*, «J. Nematol.», 1, p. 290.
- HOITINK H.A.J., FYNN R.P., MCMAHON R.W., ATMATJIDOU V. (1991): *Transmission of plant pathogens in an ebb and flood system*, «Ohio Florists' Assoc. Bull.», 742, pp. 5-9.
- HONG C.X., MOORMAN G.W. (2005): *Plant pathogens in irrigation water: challenges and opportunities*, «Crit. Rev. in Plant Sci.», 24, pp. 189-208.
- JENKINS S.F., AVERRE C.W. (1983): *Root diseases of vegetables in hydroponic culture systems in North Carolina greenhouses*, «Plant Dis.», 67, pp. 968-970.
- KEGLER H., GRIESBACH E., SKADOW K. (1982): *Ausbreitung von Pathogenen beim Tomatenanbau im NFT-Verfahren*, «Arch. Gartenbau», 7, pp. 325-337.
- LIEVENS B., BROUWER M., VANACHTER A., LEVESQUE C.A., CAMMUE B.P.A., THOMMA B. (2003): *Design and development of a DNA array for rapid detection and identification of multiple tomato vascular wilt pathogens*, «FEMS Microbiol. Lett.», 223, pp. 113-122.
- MANNINI P. (2006): *Qualità e uso dell'acqua di irrigazione*, «I Georgofili. Quaderni», 2005-IV, pp. 11-31.
- MATTA A., PENNAZIO S. (1984). *Elementi di fisiopatologia vegetale*, Pitagora Editrice, Bologna.
- MCCARTER-ZORNER N.J., FRANC G.D., HARRISON M.D., MICHAUD C.E., QUINN I., SELLS I.A., GRAHAM D.C. (1984): *Soft rot Erwinia bacteria in surface and underground waters in southern Scotland and in Colorado, United States*, «J. Appl. Bacteriol.», 57, pp. 95-105.
- MORICCA S., GINETTI B., RAGAZZI A. (2012a): *Species- and organ-specificity in endophytes*

- colonizing healthy and declining Mediterranean oaks*, «Phytopathol. Mediterr.», 51, (3), pp. 587-598.
- MORICCA S., UCCELLO A., GINETTI B., RAGAZZI A. (2012b): *First Report of Neofusicoccum parvum Associated with Bark Canker and Dieback of Acer pseudoplatanus and Quercus robur in Italy*, «Plant Dis.», 96, pp. 1699.
- MORICCA S., RAGAZZI A. (2008): *Fungal endophytes in Mediterranean oak forests: a lesson from Discula quercina*, «Phytopathology», 98, pp. 380-386.
- MORICCA S., UCCELLO A., RAGAZZI A., (2008): *Altered incidence and distribution range of some phytopathogens in Mediterranean woods*, Proc. IUFRO Working Party 7.03.10 "Methodology of Forest Insect and Disease Survey in Central Europe", Štrbské Pleso, Slovakia, September 15 -19, 2008, pp. 125-129.
- MOORMAN G.W., KANG S., GEISER D.M., KIM S. H. (2002): *Identification and characterization of Pythium species associated with greenhouse floral crops in Pennsylvania*, «Plant Dis.», 86, pp. 1227-1231.
- NAZZARENO A., OLIVERO G. (1986): *Patologia vegetale e difesa delle piante*, Edizioni Cleav, Milano, p. 330.
- NYKÄNEN M.L., PELTOLA H., QUINE C.P., KELLOMÄKI S., BROADGATE M. (1997): *Factors affecting snow damage of trees with particular reference to European conditions*, «Silva Fenn.», 31, pp. 193-213.
- PARES R.D., GUNN L.V., CRESSWELL G.C. (1992): *Tomato mosaic virus infection in a recirculating nutrient solution*, «J. Phytopathol.», 135, pp. 192-198.
- PETHERBRIDGE F.R., JONES F.G.W. (1944). *Beet eelworm (Heterodera schachtii Schm.) in East Anglia, 1934-1943*, «Ann. Appl. Biol.», 31, pp. 320-332.
- RAGAZZI A., GINETTI B., MORICCA S. (2012): *First Report of Biscogniauxia mediterranea on English Ash in Italy*. «Plant Dis», 96, pp. 1694.
- RIZZO D.M., GARBELOTTO M., DAVIDSON J.M., SLAUGHTER G.W., KOIKE S.T. (2002): *Phytophthora ramorum as the cause of extensive mortality of Quercus spp. and Lithocarpus densiflorus in California*, «Plant Dis.», 86, pp. 205-14.
- RODRIGO, J. (2000): *Review: spring frost in deciduous fruit trees-morphological damage and flower hardiness*, «Sci. Hort.», 83, pp. 155-173.
- SAKALIDIS M.L., SLIPPERS B., WINGFIELD B.D., HARDY G.E.St.J., BURGESS T.I. (2013): *The challenge of understanding the origin, pathways and extent of fungal invasions: global populations of the Neofusicoccum parvum-N. ribis species complex*, «Divers. Distrib.», 19, pp. 873-883.
- SCANU B., LINALDEDDU B.T., FRANCESCHINI A., ANSELMINI N., VANNINI A., VETTRAINO A.M. (2013): *Occurrence of Phytophthora cinnamomi in cork oak forests in Italy*, «For. Pathol.», 43 (4), pp. 340-343
- SCHOENEWEISS D.F. (1975): *Predisposition, stress and plant disease*, «Ann. Rev. Phytopathol.», 13, pp. 193-211.
- SHEA S.R., SHEARER B.L., TIPPETT J.T., DEEGAN P.M. (1984): *Distribution, reproduction, and movement of Phytophthora cinnamomi on sites highly conducive to jarrah dieback in south Western Australia*, «Plant Dis», 67, pp. 970-973.
- SHOKES F M., MCCARTER S.M. (1976): *Occurrence of plant pathogens in irrigation ponds in Southern Georgia*, «Proc. Am. Phytopathol. Soc.», 3, p. 342.
- SCHUSTER M.L. (1959): *Relation of root-knot nematodes and irrigation water to the incidence and dissemination of bacterial wilt of bean*, «Plant Dis. Rep.», 43, pp. 27-32.
- SIVIERO P., BERGAMINI L. (2001): *Le fisiopatie*, «Inf. Agrar.», 57 (16), pp. 35-40.

- SLIPPERS B., WINGFIELD M.J. (2007): *Botryosphaeriaceae as endophytes and latent pathogens of woody plants: Diversity, ecology and impact*, «Fungal Biol. Rev.», 21, pp. 90-106.
- STEADMAN J.R., MAIER C.R., SCHWARTZ H.F., KERR E.D. (1975): *Pollution of surface irrigation waters by plant pathogenic organisms*, «Water Resour. Bull.», 11, pp. 796-804.
- THOMSON S.V., ALLEN R.M. (1974): *Occurrence of Phytophthora species and other potential plant pathogens in recycled irrigation water*, «Plant Dis. Rep.», 58, pp. 945-949.
- VANNINI A., VETTRAINO A. M. (2006): *Effetti interattivi dell'acqua e dei patogeni nello sviluppo di malattie in ambito agro-forestale*, «Ital. J. Agron. / Riv. Agron.», 3, pp. 563-568.
- VETTRAINO AM, BARZANTI GP, BIANCO MC, RAGAZZI A., CAPRETTI P., PAOLETTI E., LUISI N., ANSELMINI N, VANNINI A. (2002): *Occurrence of Phytophthora species in oak stands in Italy and their association with declining oak trees*, «Forest Pathol.», 32, pp. 19-28.
- WEBBER J.F., MULLET M., BRASIER C.M., (2010): *Dieback and mortality of plantation Japanese larch (Larix kaempferi) associated with infection by Phytophthora ramorum*, «New Dis. Reports», 22, p. 19.

Finito di stampare in Firenze
presso la tipografia editrice Polistampa
nel giugno 2014